

Lähestymistapoja lannoitussuunnitteluun

Kierrätysravinteiden haasteita

Tuomas J. Mattila



Lähestymistapoja lannoitus suunnitteluun

Kierrätysravinteiden haasteita

Tuomas J. Mattila



SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUKSEN RAPORTTEJA 28 | 2019

Suomen ympäristökeskus

Kulutuksen ja tuotannon keskus

Kirjoittajat: Tuomas Mattila ¹⁾

¹⁾ Suomen ympäristökeskus

Vastaava erikoistoimittaja: Ari Nissinen.

Rahoittaja/toimeksiantaja: Ympäristöministeriö RAKI2, Soilfood Oy

Julkaisija ja kustantaja: Suomen ympäristökeskus (SYKE)

Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki, puh. 0295 251 000, syke.fi

Taitto: Tuomas Mattila

Kannen kuva: Tuomas Mattila

Julkaisu on saatavana veloitusetta internetistä: www.syke.fi/julkaisut | helda.helsinki.fi/syke sekä ostettavissa painettuna SYKEN verkkokaupasta: syke.juvenesprint.fi

ISBN 978-952-11-5051-7 (nid.)

ISBN 978-952-11-5052-4 (PDF)

ISSN 1796-1718 (pain.)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

Julkaisuvuosi: 2019

TIIVISTELMÄ

Lähestymistapoja lannoitus suunnitteluun

Lannoitus suunnittelu on haastavaa, koska siinä yhdistetään tietoja maaperän viljavuudesta, kasvin ravinnetarpeista ja lannoitteiden ominaisuuksista. Lisäksi lopputuloksen pitäisi olla kustannuksiltaan edullinen ja vastata lainsäädännön vaatimuksia. Erilaiset laskennalliset työvälineet (suunnitteluohjelmistot) soveltuvat hyvin tämän tyyppiseen päätöksentekoon, jossa pitää samanaikaisesti huomioida useita tekijöitä ja tekijät ovat mitattavissa tai mallinnettavissa. Tässä raportissa tarkastellaan lannoitus suunnittelun perusteita: kasvien ravinteiden ottoa, maan viljavuuden määrittämistä ja eri lannoitelähteiden soveltuvuuden arviointia. Lisäksi esitetään toimintatapa, jolla nämä perusteet saadaan yhdistettyä päätöksentekoon tueksi ja jota voidaan soveltaa optimointiohjelmistojen rakentamiseen.

Asiasanat: ravinteet, kasvintuotanto, kierrätyslannoitteet, maaperä, optimointi

SAMMANDRAG

Planering för optimal gödning

Planering för optimal gödning är komplex. En bra plan integrerar markegenskaper med växtnäringsbehov och olika gödningsmedel. Dessutom bör den planen uppfylla lagar och bestämmelser och ha en låg kostnad. Beslutsstödsystem (DSS, *decision support system*) används ofta i komplexa situationer, som har flera samtidiga frågor men alla faktorer kan beräknas. I denna rapport presenteras bakgrundsfaktorerna (näringsupptagning, jordfruktbarhet, egenskaper av gödsel) för planering för gödning. Rapporten också presenterar en sätt att formulera planering som en matematisk optimeringsproblem. Rapporten fungerar som en introduktion till gödning och som en bakgrundsdokument för ytterligare optimering.

Nyckelord: växtnäring, gödsel, linear optimering, jord, näringsämnen

ABSTRACT

Approaches to optimal fertilizer management

Planning for optimal fertilizer use is a complex task. A good plan integrates soil properties with plant nutrient needs and the availability of different fertilizers. In addition the resulting plan should have a low cost of implementation and should fulfill current regulations and laws. Decision support systems (DSS) are commonly applied to help in planning such complex situations, which have several issues to consider simultaneously, but all the factors can be expressed in numbers. This report presents the background factors (nutrient uptake, soil fertility, fertilizer evaluation) to consider in fertilizer planning and presents one way to formulate the planning problem as a mathematical optimization algorithm. The report serves as a introduction to fertilizer management and as a background document for further optimization software development.

Keywords: nutrients, plant production, nutrient recovery, soil, optimization

ESIPUHE

Lannoittaminen on murroksessa. Kierrätyslannoitteita ja maanparannusaineita tulee markkinoille jatkuvasti. Toisaalta vuosikymmenten lannoituksen seurauksena maaperän ravinnepitoisuudet ovat nousseet tasolle, jossa entisenkaltainen ravinteiden lisäys ei ole enää tehokasta luonnonvarojen käyttöä. Viljelijöiden ja neuvojien käytössä on yhä enemmän tietoa lannoituksen suunnitteluun, mutta lannoitus on siitä huolimatta monimutkaista. Hyvässä lannoitussuunnittelussa yhdistetään tietoja maaperästä, kasveista ja lannoitteista siten, että saavutetaan mahdollisimman suuri hyöty viljelylle mahdollisimman pienillä haitoilla ympäristölle.

Tämän raportin tarkoituksena on tukea viljelijöitä, neuvojia ja lannoitesuunnitteluohjelmistojen kehittäjiä paremmassa lannoituksessa. Lähestymistapa on tieteellinen mutta käytännönläheinen, ja raportissa esitellään tutkimuskirjallisuuden avulla lannoitussuunnittelun perustekijät: kasvien ravinteiden otto, maaperän viljavuus ja lannoitevalmisteiden ominaisuudet. Sen jälkeen esitellään eri tapoja yhdistää tietoja lohkokohtaiseksi lannoitussuunnitelmaksi. Lopuksi esitellään eräs tapa koota tiedot yhteen lannoitussuunnitteluohjelmistoksi eli ”LaPaMa – lannoita paremmin malliksi”.

Raportti ja mallin kehitys on syntynyt yhteistyössä viljelijöiden, neuvojien ja projektityöntekijöiden kanssa. Hankkeella oli ohjausryhmä, johon kuuluivat Proagriasta Terhi Taulavuori, Pertti Savela, Pasi Hartikainen, Tero Tolvanen, Pekka Terhemaa, Iina Haikarainen, Heikki Ajosenpää, Biolan Oy:stä Hanna-Maija Fontell ja Tuomas Peltto-Huikko, Humuspehtoori Oy:stä Suvi Mantsinen, Soilfood Oy:stä Sampo Järnefelt ja Juuso Jona, Lantmannen Oy:stä Hanna Mäkinen, Karelia Ammattikorkeakoulusta Markku Huttunen ja Anssi Kokkonen, SYKEstä Jyri Seppälä, Tanja Myllyviita, Suvi Lehtoranta, Sampo Soimakallio ja Jaakko Karvonen sekä Helsingin yliopistosta Torsti Hyyryläinen ja Hanna-Maija Väisänen. Erityiskiitokset yhteistyöstä myös Jukka Rajalalle ja Ritva Mynttiselle (HY Ruralia Instituutti), ProAgrian neuvojille (Pekka Terhemaa, Pasi Hartikainen ja Tero Tolvanen) sekä lannoitussuunnittelun osaamisryhmien viljelijöille Kaakkois-Suomessa ja Pohjois-Karjalassa. Työ ei olisi myöskään ollut mahdollista ilman ympäristöministeriön rahoitusta sekä Soilfood Oy:n tukea.

Kasvinravitseminen on laaja aihe ja tässä keskitytään vain osaan siitä. Kirjallisuusviitteiden avulla tiedonjanoinen lukija löytää kuitenkin runsaasti lisätietoa. Toivottavasti raportti herättää hyviä keskusteluita lannoituksen perusteista ja kannustaa suunnittelemaan lannoitusta entistä paremmin.

Lohjalla, 25.4.2019, raportin tekijä.



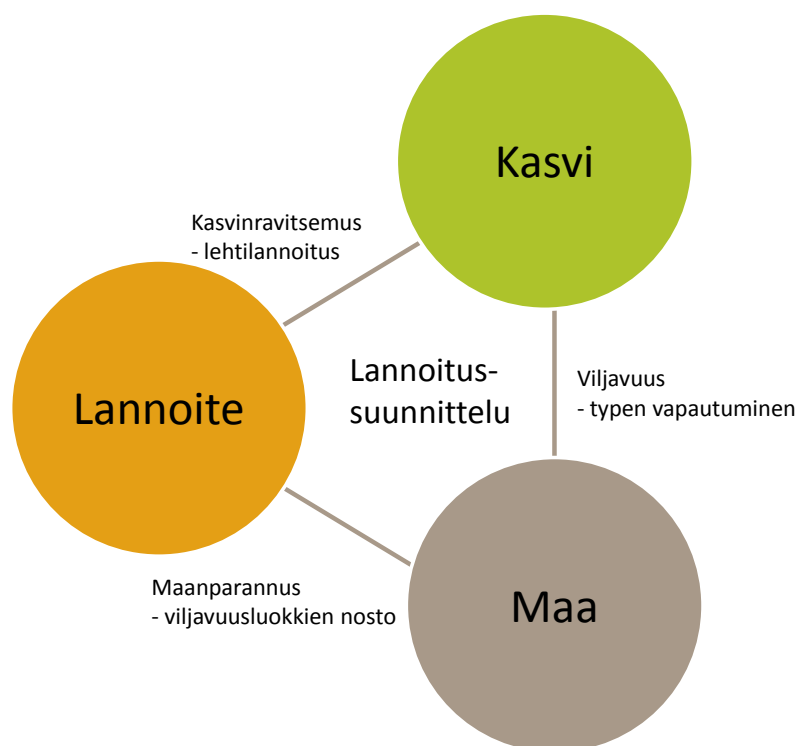
SISÄLLYS

Johdanto	7
Lannoitussuunnittelu on kokonaisvaltaista ongelmanratkaisua.....	10
Millä tiedoilla lannoitussuunnittelua tehdään?	14
Kasvin ravinnetarve ja ravinnelähteet	14
Viljavuusanalyysin tulkinta	16
Kierrätyslannoitteiden lannoitusarvo ja typen vapautuminen	18
Lannoituksen vaikutus maan multavuuteen, happamuuteen ja kalkitustarpeeseen	20
Lähestymistapoja lannoituksen optimointiin.....	22
Kustannus-hyöty-analyysi ja kustannustehokkaimpien ravinnelähteiden tunnistaminen	22
Maaperän ravinnearvojen pitäminen tavoitetasolla	24
Lannoituksen jakaminen kasvianalyysin perusteella	25
Periaatteiden soveltaminen käytännössä – lannoituslaskuri.....	26
Lähestymistapa	26
Lannoituksen hyödyn määrittäminen	26
Kasvin ravinnetarpeen arviointi	28
Lohkon ravinnevarantojen arviointi	28
Lannoituksen optimointi	29
Esimerkkilannoitussuunnitelmat 24 koelohkolle	30
Johtopäätökset	33
Lähteet	34

Johdanto

Lannoitus suunnittelussa yhdistetään tietoja maaperästä, kasveista ja lannoitteiden ominaisuuksista. Tavoitteena on saada tasapainotettua lannoituksen avulla maaperästä vapautuvia ravinteita siten, että turvataan kasvin ravinnetarve ja säädellään maaperän ravinnetasapainoa.

Lannoituksella on monia tehtäviä (Kuva 1). Lannoituksen avulla täydennetään kasvin käytettävissä olevia ravinteita joko suoraan tai välillisesti maaperän ravinnepitoisuuksien ja –suhteiden kautta (Kirkby, 2012). Osalla ravinteista on merkittävä vaikutus myös maan rakenteeseen ja viljeltävyyteen (Dontsova ja Norton, 2002). Hyvä lannoitus suunnittelu on asioiden yhdistelyä: sen avulla pyritään käyttämään lannoitteita mahdollisimman tehokkaasti maaperän ja kasvien kannalta minimoiden haitalliset vaikutukset ympäristöön.

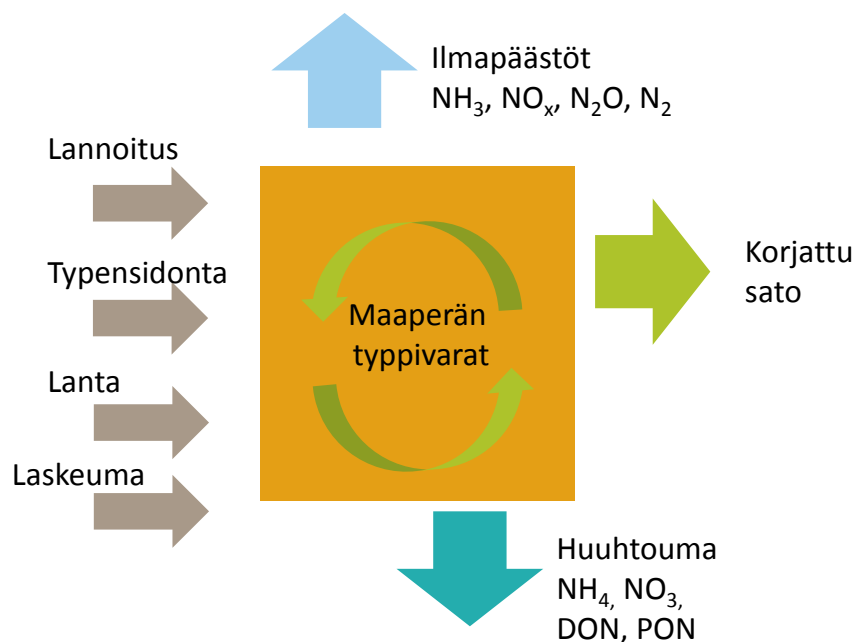


Kuva 1. Hyvä lannoitus suunnittelu yhdistää tietoja maaperästä, kasvista ja lannoitteista.

Lannoitus suunnittelua yksinkertaistamaan on kehitetty erilaisia lähestymistapoja. Ravinnetaseeseen perustuvassa lannoituksessa lisätään vuosittain ravinteita sama määrä, kuin arvioidaan poistuvan sadossa (*off-take*) (Olson ym., 1982). Koska poistuva ravinemäärä on vain osa kokonaisravinteiden otosta, voidaan arvioida myös koko ravinteidenotto (*uptake*) ja lannoittaa sen perusteella (IPNI, 2019). Koska esimerkiksi vain noin 60-70 % lisäystä tyypestä päätyy kasviin, tämä lähestymistapa johtaa yllannoitukseen ja ravinnehuuhtoumien lisääntymiseen (Karklins ja Ruza, 2015; Zhang ym., 2015). Tätä lähestymistapaa parempi on järjestelmä, jossa lannoitus pohjautuu viljelykasvin satovastekäyriin eli siihen, paljonko sato lisääntyy, kun lannoitusta lisätään (Cerrato ja Blackmer, 1990; Weil ja Brady, 2016). Kun lisälannoituksen hyödyt ovat alemmat kuin sen kustannukset, lannoitustaso on optimaalinen ja usein paljon alempi kuin sadon ottama kokonaisravinemäärä (Cerrato ja Blackmer, 1990; Olson ym., 1982). Satovasteen vaatimat porraskokeet vaativat kuitenkin runsaasti aikaa ja niiden yleistettävyys muille

lohkoille on haastavaa, sillä esimerkiksi maaperästä vapautuvan typen määrä vaihtelee lohkoktasolla (Karklins ja Ruza, 2015). Maaperästä vapautuvan typen määrän arvioinnilla on voitu vähentää tilakoikeissa typpilannoitustasoja jopa 30-50 % ilman vaikutusta satoon (Haney ym., 2018; Harmel ja Haney, 2013). Tulos on merkittävä, sillä kokeet tehtiin Yhdysvalloissa, jossa typen hyötykäyttösuhde on jo valmiiksi korkealla tasolla (Zhang ym., 2015). Mitä paremmin lannoitussuunnittelussa voidaan käyttää tietoa maaperän ominaisuuksista ja kasvien ravinteiden otosta, sitä paremmin lannoitus saadaan sovitettua lohkon olosuhteisiin.

Lannoituksen tarkka suunnittelu on tärkeää myös resurssitehokkuuden kannalta. Mitä tarkemmin kasvin ravinteiden käyttökelpoisuus saadaan vastaamaan kasvin ravinnetarpeita, sitä pienemmäksi jäävät hävikit vesistöihin ja ilmakehään (Kuva 2). Samalla parannetaan maatalouden kannattavuutta.



Kuva 2. Lannoitus on vain osa peltolohkon typpitasetta (piirretty Zhang ym., (2015) perusteella) (DON = *dissolved organic nitrogen*, vesiliukoinen orgaaninen typpi; PON = *particulate organic nitrogen*, kiintoaineeseen sitoutunut orgaaninen typpi).

Ravinnetase voidaan esittää myös yksinkertaisena laskentakaavana (kaava 1) (Karklins ja Ruza, 2015):

$$(s + k) + h = m + l + e + v \quad (1)$$

s = sadon mukana poistuvat ravinteet

k = muut kuin sadon mukana poistuvat, kasvin ottamat ravinteet, jäävät seuraavien vuosien kasvin-tähteiksi

h = ravinnehävikki, huuhtouma tai haihdunta

m = maaperästä vapautuvat tai maaperään sitoutuvat ravinteet

l = lannoitus

e = edellisvuosien kasvintähteistä, biologisesta typensidonnasta ja edellisvuosien lannasta vapautuvat ravinteet

v = maavedessä liukoiset ja helposti vaihtuvat ravinteet.

Ravinnehävikki vesistöön muodostuu lisättyjen, vapautuvien ja jo liukoisten, sekä kasvin poistamien ravinteiden erotuksena. Jos haluttaisiin lannoittaa siten, että hävikkiä ei synny, taseen pitäisi olla tasapainossa ja optimilannoitustason voi laskea:

$$I = (s + k) - (m + e + v) = u - a \quad (2)$$

missä u = ravinteiden otto (*uptake*)

a = ravinteiden saatavuus (*availability*)

Typen osalta tarkastelua on tehty eniten ja viljelysuunnittelussa pyritään huomioimaan maaperästä vapautuva, kasvintähteistä vapautuva ja maassa liukoisena oleva typpi. Kasvit tarvitsevat kuitenkin useampia ravinteita kuin typpeä (noin 21 alkuainetta on tunnistettu kasveille hyödyllisiksi, (Kirkby, 2012)).

Tase voidaan muotoilla typen (Kuva 2) lisäksi mille tahansa ravinteelle. Laskukaavat ovat samoja myös kun otetaan huomioon useampia ravinteita yhtä aikaa, mutta silloin kaavojen muuttujat ovat useamprivisiä vektorimuuttujia.

Lannoituksen tehokkuutta voidaan arvioida erilaisten hyötysuhteiden avulla. Yksinkertaisin hyötysuhde on ulkopuolisten panosten ja sadossa poistuvan sadon suhdeluku (ravinteiden käyttötehokkuus eli *Nutrient Use Efficiency, NUE* = $s : (I + e)$). Lisäksi voidaan arvioida taseen perusteella ylimääräinen ravinne, lannoituksen ja sadossa poistuvan ravinteiden erotuksena. Erot typen käytön hyötysuhteissa ovat merkittäviä maiden välillä: Yhdysvalloissa typen hyötysuhde on luokkaa 60-70 % ja Kiinassa vain 20-30 %, Suomessa typen hyötysuhde on kaksinkertaistunut 1970-luvun tasosta (25 %) 2010-luvulle (50 %) (Zhang ym., 2015).

Kierrätysravinteet tekevät lannoitussuunnittelusta haastavampaa. Eloperäiset kierrätysravinteet sisältävät useita ravinteita, joten yksittäisen ravinteiden mukaan suunnittelu muuttuu haasteellisemmaksi (Sullivan ym., 2010). Jos kierrätyslannoitteita käytetään yksittäisen ravinteiden täydentämiseen, muita ravinteita voi tulla liikaa kasvin tarpeisiin nähden. Lisäksi vain osa tyypestä vapautuu, osan sitoutuessa hajotustoimintaan ja muuttuessa osaksi maaperän orgaanista ainetta (Sullivan ym., 2010). Osa hitaammin vapautuvasta tyypestä on käyttökelpoista myöhemminä kasvukausina.

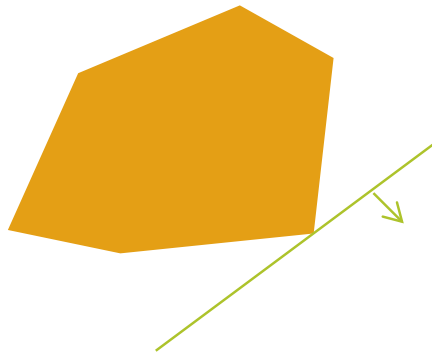
Kierrätyslannoitteilla voi olla myös muita kuin kasvinravitsemuksellisia hyötyjä (Celestina ym., 2019). Typpi-, fosfori- ja rikkilannoitteet tyyppillisesti happamoittavat maata, kun taas kationeja sisältävät lannoitteet vähentävät maan happamuutta eli nostavat maan pH:ta (Harmsen ym., 1990). Eloperäisissä lannoitteissa vaikutus on yleensä kalkitseva, joten ylläpitokalkitusta tarvitaan vähemmän. Eloperäinen lannoitus ylläpitää ja voi lisätä maan multavuutta. Lisäksi osa kierrätyslannoitteista sisältää kasvunestiteitä eli biostimulantteja, kuten vinassin sisältämä betaiini ja kompostien sisältämät fulvohapot (Calvo ym., 2014).

Jotta lannoitteista saataisiin täysi hyöty, niitä tulisi käyttää suunnitelmallisesti täydentämään maaperästä vapautuvien ravinteiden määrää suhteessa kasvin ravinnetarpeeseen. Lisäksi niiden vaikutukset kalkitukseen, multavuuteen ja kasvien kasvuun tulisi huomioida. Kierrätysravinteiden järkevä käyttö vaatii moniulotteista tarkastelua. Tässä raportissa lannoitussuunnittelua jäsennellään ongelmanratkaisun näkökulmasta. Ensin tarkastellaan lannoitussuunnittelun osa-alueita ja niiden tuomia tavoitteita ja reunaehdoja. Lopuksi luonnostellaan kokonaiskuvaa siitä, miten eri osa-alueet kootaan lannoitussuunnittelun työvälineeksi eli matemaattiseksi optimointiongelmaksi. Tällä lähestymistavalla saadaan eri osa-alueet huomioitua kattavasti ja yhdistettyä ne tuottamaan vastauksia siihen, miten lannoitus kannattaisi suunnitella.

Lannoitus suunnittelu on kokonaisvaltaista ongelmanratkaisua

Lannoitus suunnittelu on moniulotteista, joten sitä voidaan tarkastella monitavoitteisena päätösongelmana, johon voidaan soveltaa näiden ongelmien ratkaisuun kehitettyjä matemaattisia menetelmiä.

Lannoitus suunnittelua voidaan tarkastella myös matemaattisena ongelmana (kaava 2). Matemaattisen optimoinnin saralla on ratkottu hyvin moniulotteisia ja monimutkaisia ongelmia melko yksinkertaisilla ratkaisutavoilla. Tyypillisesti ongelma määritellään kohdefunktion (tavoite), rajoitteiden (reunaehdot) ja päätösmuuttujien (mitä voidaan muuttaa) kautta. Jos näiden väliset suhteet ovat lineaarisia (suoraviivaisia), voidaan hyödyntää lineaariohjelmointia, jolla voidaan ratkoa hyvin moniulotteisia ongelmia (Kuva 3) (Bertsimas ja Tsitsiklis, 1997).



Kuva 3. Optimointiongelma määritellään päätösmuuttujien, rajoitteiden ja kohdefunktion avulla. Tässä kuvassa on kaksiulotteinen ongelma, jossa kohdefunktio on vihreä viiva, jota pyritään saamaan nuolen osoittamaan suuntaan. Ongelman rajoitteina ovat monikulmion kuusi sivua. Optimaalinen ratkaisu löytyy monikulmion kulmasta, jossa vihreää viivaa saadaan vietyä eniten nuolen osoittamaan suuntaan.

Kaavana ilmaistuna optimointiongelma on muotoa:

Maksimoi $\mathbf{c} \mathbf{x}$, (3)

siten että $\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$

$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}$

missä \mathbf{x} = päätösmuuttujien vektori (n päätösmuuttujaa)

$\mathbf{c} \mathbf{x}$ = kohdefunktio, jossa kutakin päätösmuuttujaa vastaa hyötykerroin \mathbf{c}

$\mathbf{A} \mathbf{x}$ = rajoitteiden reunojen kuvaus, missä \mathbf{A} on matriisi

\mathbf{b} = reunaehdot.

Perusmuodossaan optimointiongelmat on tapana ilmoittaa tavoitteen maksimointina siten, että reumat eivät saa ylittää rajoitteita (Bertsimas ja Tsitsiklis, 1997). Ongelmat voidaan kuitenkin palauttaa tähän muotoon, vaikka ne olisi alun perin muotoiltu esimerkiksi tavoitteen minimointina tai tiettyjen arvojen olemisena yli tiettyjen raja-arvojen. Jos ongelma saadaan muotoiltua kaavan 3 kuvaamaan muotoon, voidaan hyödyntää lineaariohjelmoinnin menetelmiä, joita on käytetty vuosikymmeniä erilaisten ongelmien ratkaisuun. Maataloudessa sovellusalueet vaihtelevat rehusuunnittelusta (Dent ja Casey, 1967) kasvin aineenvaihdunnan tutkimukseen (Sweetlove ja Ratcliffe, 2011). Tyypillisesti tavoite ilmaistaan yhden muuttujan avulla, mutta monitavoiteoptimoinnissa tavoitteita voi olla useita.

Jotta lannoitussuunnittelua voidaan käsitellä optimointiongelmana, se pitäisi kuvata järjestelmänä, jossa on rajoitteita, tavoitteita ja muutettavia asioita. Lannoitus käsittelee lannoitteiden määrää ja ajoitusta, joten ne ovat luonteavia päätösmuuttujia (Taulukko 1). Tavoitteita voidaan muodostaa eri tavoin. Eräs vaihtoehto olisi pyrkiä mahdollisimman alhaisiin kustannuksiin. Tällöin rajoitteina toimivat kasvin ja maaperän ravinnetarpeet. Ongelmana olisi tuottaa tarvittava määrä ravinteita mahdollisimman edullisesti. Tätä optimointitapaa on käytetty sekä lannoitteiden suunnittelussa että rehuseostuksessa (Dent ja Casey, 1967). Toinen vaihtoehto olisi pyrkiä maksimoimaan sato, tai sadon arvon ja lannoituksen kustannuksen erotus. Tällöin tarvittaisiin tietoa sadon ja lannoituksen välisestä suhteesta (satovastekäyrä) (Cerrato ja Blackmer, 1990).

Taulukko 1. Lannoitussuunnittelu optimointiongelmana esitettynä (kaava 3).

Tavoitteet c x	Päätösmuuttujat x	Rajoitteet Ax < b
Minimoi kustannukset (tai "Maksimoi tietyllä kustannuksella saadut ravinteet" tai "Maksimoi lisäsadon arvon ja lannoituksen kustannuksen erotus")	Mitä lannoitteita? Kuinka paljon? Mihin aikaan? Millä menetelmällä?	Kasvin ravinnetarve Maaperän viljavuus Levitysmäärien tekniset rajoitteet Varastokapasiteetti Hallinnolliset rajat (fosfori, typpi) Haitta-aineiden lisäyksen ylärajat Kasvinviljelylliset ylärajat (kupari, natrium, jne.) Tuotantosopimusten rajoitteet (luomu, puutarhakasvit) Kalkitustarve Vaikutus hiilivarastoon

Taulukon 1 perusteella koottu lannoitussuunnittelumalli on moniulotteinen. Päätösmuuttujia on vähintään yhtä paljon kuin on käytettävissä olevia lannoitteita. Ruokaviraston luonnonmukaiseen tuotantoon hyväksytyjen lannoitteiden ja maanparannusaineiden luettelossa on tätä kirjoitettaessa noin 280 tuotetta. Mikäli lannoitteiden ajoitusta halutaan jakaa esimerkiksi syksyllä tehtävään maanparannukseen, keväiseen peruslannoitukseen, starttilannoitukseen ja kasvustolannoitukseen, päätösmuuttujien määrä kasvaa nelinkertaiseksi.

Optimointia tehdään usein yhden ravinteen (esimerkiksi typen tai fosforin) suhteen. Kasvit käyttävät kuitenkin kasvuunsa ainakin 21 alkuainetta (Kirkby, 2012). Näitä kutsutaan pää- (N, P, K), sivu- (Ca, Mg, S) ja hivenravinteiksi (Cu, Zn, Mn, B, Mo, Co). Lisäksi useat alkuaineet ovat tärkeitä sadon ravintokäytön kannalta (esim. Se) tai kasvin kasvua edistäviä (esim. Si). Mikäli lannoitussuunnittelu tehtäisiin kattavasti, kaikki kasvinravinteet pitäisi huomioida. Kasvin pitoisuudet voivat vaihdella huomattavasti viljelykasvin, kasvuasteen ja ravinnetilan perusteella (Bryson ja Mills, 2015). Eri ravinteiden huomioiminen lisää optimointiongelman rajoitteiden määrää. Lisäksi käytettävistä lannoitteista tarvitaan tiedot niiden sisältämistä ravinnemääristä ja ravinteiden käyttökelpoisuudesta (esimerkiksi vapautumisajasta) kasveille.

Kasvin ravinnetarpeen lisäksi lannoitusmääriin vaikuttavat maaperästä ja kasvintähteistä vapautuvien ravinteiden määrä kaavan 2 mukaisesti (*lannoitus = ravinteiden otto – maaperästä vapautuvat ravinteet*). Lannoituksella täydennetään maaperästä ja kasvintähteistä vapautuvia ravinteita siten, että viljelykasvilla on riittävästi ravinteita kasvuun. Jotta ravinnepitoisuudet saadaan pidettyä tavoitetasolla, teoriassa riittää kun vuosittain lisätään sadon mukana poistuva määrä ravinteita takaisin (taseajattelu). Tällöin kaavan 2 mukaisesti saadaan $I = s$, mikä vastaa myös käytössä olevaa ravinnetasetarkastelua (Salo ym., 2014).

Viljavuusanalyysi ei kuitenkaan kuvaa koko maaperän ravinnevarastoa. Esimerkiksi kaliumin osalta maaperässä on kaliumia liukoissa, vaihtuvassa ja sitoutuneessa muodossa sekä lisäksi kiviaineksesa. Eri olomuodot ovat dynaamisessa tasapainotilassa. Viljavuusanalyysi mittaa lähinnä liukoista ja vaihtuvaa varastoa. Kun helppoliukoisten ravinteiden pitoisuudet laskevat, maan heikommin liukoista varastoista vapautuu lisää kaliumia vaihtuvaan ja liukoiseen muotoon. Ravinnereservit köyhtyvät vähi-

tellen, mutta kaliumia ja fosforia voi olla maaperässä tuhansia kiloja 20 cm syvyisessä maakerroksessa (OSMO hankkeen koelohkoilla varastofosforia oli 400-2000 kg ruokamultakerroksessa (Mattila ja Rajala, 2017)). Kun maaperän ravinnereserveistä vapautuvat ja toisaalta huuhtouman mukana poistuvat ravinteet otetaan huomioon, ravinnetase muuttuu muotoon $I = s - m + h$.

Kaikki lannoituksen mukana lisätty ravinne ei ole kasveille käyttökelpoista. Osa päätyy kasvin sijaan maaperän ravinnereserveihin ja osa poistuu hävikkeinä pellostä (ilma- ja vesipäästöt). Lannoitus suunnittelussa joudutaan tekemään oletuksia siitä, mikä on lisättyjen ravinteiden hyötysuhde, eli kuinka suuri osa lisätystä ravinteesta päätyy kasviin tai lisää maaperästä mitattujen ravinteiden määrää. Kirjallisuuskatsauksen perusteella typen hyötysuhde on vain noin 60-70 % (Zhang ym., 2015) ja suurellakin lannoitustasolla vain noin 50-60 % kasvin käyttämästä typestä on peräisin lannoituksesta (Karklins ja Ruza, 2015). Eri ravinnelähteiden käyttökelpoisuudesta on heikosti tietoa. Typen ja fosforin osalta lannoitusmääriä säädellään arvioidun ravinteiden käyttökelpoisuuden perusteella. Typen lisäksi käyttökelpoisuus vaikuttaa etenkin hivenravinteisiin. Esimerkiksi tuhka voi sisältää runsaasti sinkkiä tai mangaania, mutta hapettuneiden oksidimuotoisten ravinteiden käyttökelpoisuus on alhainen (Amrani ym., 1999; Schulte, 1992). Tästä huolimatta tuhka toimii mangaani- ja sinkkilannoitteena (Jakubus ja Tatuško, 2017).

Tarkastelua monimutkaistaa se, että kasvin ravinteiden otto ei ole tasaista vaan jaksottuu kasvukaudella eri vaiheisiin. Tyypillisesti ravinteiden otto kasvaa huomattavasti kasvin aloittaessa suurimman kasvullisen (vegetatiivisen) kasvun ja suvullisen lisääntymisen (generatiivinen kasvu). Viljoilla ja heinäkasveilla nämä ajoittuvat korrenkasvuun ja jyvän täyttymiseen (Bryson ja Mills, 2015; Römheld, 2012). Lannoituksen avulla pitäisi huolehtia siitä, että ravinteita on käytettävissä näissä kriittisissä kasvuvaiheissa. Jos kasvinravinteiden ajoitus huomioidaan karkeallakin tavalla (esimerkiksi huomioimalla ravinteiden otto ja vapautuminen alku-, keski- ja loppukasvukaudesta), se moninkertaistaa rajoitteiden määrän (esimerkiksi kaikilla ravinteilla $21 \times 3 = 63$ rajoitetta). Lisäksi jokaista lannoitetta kohden tarvitaan samoin 63 muuttujaa, jotka kuvaavat eri ravinteiden käyttökelpoisuutta eri ajankohtina. Vaikka tämä olisi teoriassa toteutettavissa, lisähaastetta tuo se, että kierrätyslannoitteiden ravinteiden saatavuus riippuu yleensä maaperän biologisesta aktiivisuudesta, joka on herkkä lämpötilalle ja kosteudelle. Esimerkiksi kierrätysravinteiden käyttökelpoisuuden ja ajoituksen on havaittu vaihtelevan huomattavasti vuosien välillä (Nätterlund, 2015).

Kasvien ja maaperän lisäksi lannoitus suunnittelulla on teknisiä rajoitteita. Levitystekniikka asettaa omat rajoituksensa sekä levityksen määrälle että tarkkuudelle. Nykyaikaisilla lannoitteenlevittimillä voidaan levittää rakeisia lannoitteita muutaman kilogramman tarkkuudella hehtaaria kohti. Nestemäisiä hivenlannoitteita voidaan lisätä satoja grammoja kasvinsuojelun yhteydessä. Kiinteillä lannoilla ja maanparannusaineilla minimilevitysmäärä on tyypillisesti joitain tonneja hehtaarille ja levitystarkkuus joitain satoja kiloja. Vaikka esimerkiksi pienellä kipsilannoitusmäärällä (100-200 kg/ha) voitaisiin saada kasvien rikin tarve täytettyä, niin jos ainoa tapa levittää kipsiä on kalkkivaunu, levitysmäärän on oltava vähintään 2000 kg/ha, mikä johtaa ravinteiden kannalta ylilannoitukseen. Viljelykäytännöt asettavat omat rajoitteensa. Tilalla on vain rajallinen kyky varastoida kiinteitä ja nestemäisiä lannoitteita. Lisäksi tilan kapasiteetti esimerkiksi lietteiden levitykseen on rajallinen. Tämä rajoittaa lannoitus suunnittelussa tiettyjen lannoitteiden maksimimääriä. Kotieläintiloilla lantaa muodostuu ennalta ennakoitava määrä, joka pitäisi saada levitettyä lohkoille, jotta lantavarastot eivät täytyisi. Tämä voi muodostaa joissain tapauksissa minimilevitysmäärän, joka ei ole kytköksissä kasvin ravinnetarpeisiin. Varastointi ja levitys myöskin vaikuttavat esimerkiksi typen hävikkeihin ja siten saatavaan lannoitus hyötyyn.

Maaperään kertyvät ylimääräiset ravinteet lisäävät ravinteiden huuhtoutumista. Etenkin fosforin osalta huuhtoutuminen lisääntyy nopeasti, kun fosforin pitoisuus ylittää maan kyvyn pidättää fosforia (Dari ym., 2018). Ihannetilanteessa maaperän pitoisuudet pidettäisiin mahdollisimman alhaisina, mutta kuitenkin sellaisella tasolla, että kasvinviljely on taloudellisesti kannattavaa (Fischer ym., 2017). Fosforin kertymistä maahan pyritään rajoittamaan erilaisilla hallinnollisilla rajoilla. Suomessa ympäristökorvauksen raja-arvot määrittävät maksimilisäysmäärät fosforille eri viljavuusluokilla ja maalajeilla. Mää-

rät voidaan hetkellisesti ylittää, mutta määrä on tasattava viiden vuoden aikana. (Esim. jos raja on 10 kg/ha ja yhtenä vuotena lisätään 50 kg/ha, seuraavina 4 vuotena lisätään 0 kg/ha.) ”Ympäristökorvaus-fosforin” kannalta laskennan haasteena on se, että eri fosforilähteillä arvioidaan fosforin käyttökelpoisuus eri tavoin. Osalle fosforin lähteistä käyttökelpoisuudeksi lasketaan 100 % (lanta), osalle vain 60 % (turkiseläinten lanta, lihaluujauho), osalle ei lainkaan (kipsi). Hallinnolliset rajat lisäävät laskennassa lannoitteille ominaisuuksia (fosforin laskentaosuus) sekä koko laskennalle rajoitteita (tietyn tasausjakson aikana lisäävät ravinteet).

Kierrätyslannoitteiden saatavuus on oma rajoitteensa. Kaikkia kierrätyslannoitteita ei ole saatavilla kaikkialla, rahtikustannukset vaihtelevat sijainnin perusteella ja useimmilla lannoitteilla on tietty eräko-ko, jossa rahti tehdään.

Ravinteiden lisäksi kierrätyslannoitteet sisältävät myös muita aineita, joista osa on kasveille haitallisia. Lainsäädäntö rajoittaa kadmiumin lisäystä tietyn ajanjakson aikana. Raskasmetalleille on raja-arvoja, joiden maksimipitoisuudet eivät saa ylittyä lannoitteessa riippumatta lisäysmääristä. Näiden tunnettujen epäorgaanisten aineiden lisäksi kierrätyslannoitteet voivat sisältää orgaanisia haitta-aineita, joista eniten huomiota on kiinnitetty pysyviin orgaanisiin haitta-aineisiin (nonyylifenoli, ftalaatit, bro-matut palonestoaineet) sekä erilaisiin lääkejäämiin ja myös esim. kuivikeoljen mahdollisiin torjunta-ainejäämiin ja korrenvahvistajiin.

Myös kasvinravinteet voivat olla kasveille tai maaperälle haitallisia. Boori on tyypillisin haitallinen ravinne. Pieninä pitoisuuksina boori on kasveille välttämätön mm. soluseinien rakentamiseen, mutta suuremmat pitoisuudet johtavat epämuodostumiin. Ero riittävän ja liian korkean tason välillä on pieni, esimerkiksi rukiilla tavoitealue on 1,5-4,0 µg/g, kun sinkillä se on 18-70 µg/g (Bryson ja Mills, 2015). Boorin lisäksi etenkin natrium ja kupari voivat olla kasvin lisäksi haitallisia myös maaperälle (Weil ja Brady, 2016). Natrium liittyy maaperän suolaantumiseen ja heikentyneeseen mururakenteeseen, kupari taas on myrkyllinen mm. sienille. Potentiaalisesti haitallisten aineiden osalta lannoitus suunnittelussa on syytä pitää ylärajaa näiden lisäysmäärillä. Esimerkiksi vinassi sisältää runsaasti natriumia ja toisaalta monet tuhkat ja kuonat voivat sisältää runsaasti kuparia.

Kasvinviljelyllisten, viljelytekniesten, lainsäädännöllisten ja ympäristönsuojelullisten rajoitteiden lisäksi lannoitusta säädellään erilaisilla tuotantoehdoilla. Esimerkiksi avomaan puutarhakasveilla ja luon-nonmukaisessa maataloudessa on erilaisia rajoitteita lannoitelähteiden suhteen. Tyypillisesti nämä rajoitteet ovat ehdottomia, eli tiettyjen lannoitelajien käyttö on kielletty.

Lannoitus suunnittelu on järjestelmä, jossa on paljon eri tekijöitä ja ulottuvuuksia. Eri osatekijöiden huomioiminen käsin tehtävässä suunnittelussa on erittäin haastavaa. Tyypillisesti ongelmaa kierretään koptioimalla hyväksi todettuja ratkaisuja tilalta ja lohkolta toiselle (”kasvuohjelmat”). Matemaattisena ongelmana lannoitus suunnittelu ei kuitenkaan ole monimutkaisimmasta päästä:

- Ravinnetase (kaava 2) voidaan kuvata suoraviivaisena yhteen- ja vähennyslaskuna.
- Päätösmuuttujia on kymmeniä tai satoja, mutta ei tuhansia.
- Rajoitteita on useita erilaisia, mutta rajoitteiden kokonaismäärä jää kymmeneen tai satoihin.

Yleisesti käytettävillä optimointiratkaisumalleilla voidaan ratkoa muutamassa minuutissa ongelmia, joissa on esimerkiksi 500 000 päätösmuuttujaa ja 1 200 000 rajoitetta (Mittelmann, 2019). Näihin verrattuna lannoitus suunnittelu on varsin yksinkertainen ongelma. Haasteena lannoitus suunnittelussa onkin ongelman muotoilu siten, että laskennallisesti tehokkaimmat ratkaisut ovat myös käytännössä toteutettavia ja mielekkäitä. Lisäksi niiden pitäisi pohjautua tietoihin, joita viljelyjärjestelmästä ja lannoitteista voidaan kerätä tai arvioida.

Millä tiedoilla lannoitus suunnittelua tehdään?

Hyvä lannoitus suunnittelu vaatii pohjaksi paljon tietoa. Iso osa tarvittavista tietoaineistoista on kuitenkin kerättyä valmiiksi tai on löydettävissä julkisista tietolähteistä. Osa tiedoista voidaan määrittää lohko kohtaisesti erikseen mittaamalla, mikäli suunnittelua halutaan tarkentaa.

Seuraavassa käydään läpi tietolähteitä, joita voidaan hyödyntää lannoitus suunnittelussa. Lähteet on luokiteltu kasvin, maaperän ja lannoitteiden ominaisuuksiin. Yleisesti määritettyjen arvojen lisäksi huomioidaan helposti määritettäviä lähtötietoja ja myös muuttujia, joita ei tällä hetkellä osata arvioida, mutta joihin tarvitaan lisätutkimusta. Tiedot on koottu taulukkoon 2. Seuraavissa kappaleissa käydään eri osia alueita yksityiskohtaisemmin läpi.

Taulukko 2. Kasvien, maaperän ja lannoitteiden tiedot, joita voidaan hyödyntää lannoitus suunnittelussa

	Kasvi	Maaperä	Lannoite
Helposti saatavilla	Tyypilliset ravinnepitoisuudet Arvio ravinnepoistumasta Kasvukauden kasvudynamiikka Lohkon sisäinen vaihtelu	Ravinteet viljavuusanalyysistä (N, P, K, S, Ca, Mg, Na, B, Cu, Zn, Mn, pH)	Ravinnepitoisuudet Haitta-ainepitoisuudet Arvio typen vapautumisesta
Määritettävissä	Tyypipitoisuus karttapohjaisesti Kasvianalyysi: ravinnepitoisuudet Toteutunut ravinteiden poistuma	Typen vapautumisennuste Vapautunut typpimäärä Harvinaisemmat hivenravinteet ja varastoravinteet	Orgaanisten haitta-aineiden pitoisuudet Lannoitevastaavuus tai ravinteiden käyttökelpoisuus (koeruudut)
Tarvitaan tutkimusta	Ravinteiden yhteisvaikutukset Karttapohjainen arvio kaikista ravinteista Kasvunesteiden vaikutukset	Ravinteiden vapautumisen ajoituksen ennustaminen Reserviravinteiden käyttökelpoisuus Mikrobiston vaikutus	Ravinteiden vapautumisen ajoitus Vaikutus maamikrobeihin

Kasvin ravinnetarve ja ravinnelähteet

Yksinkertaisin tapa arvioida kasvin ravinnetarvetta on huomioida korjatun sadon mukana poistuva ravinnemäärä. Esimerkiksi vehnä sisältää typpeä (N) 24 kg vehnätonnia kohti, ja 4 tonnin vehnäsato poistaa typpeä 4 t/ha x 24 kg N/t = 96 kg N/ha. Sama sato poistaa fosforia noin 15 kg/ha, kaliumia 20 kg/ha ja rikkiä 8 kg/ha (lähtötiedot MAVI, 2008). Mikäli ravinnetase halutaan pitää tasapainossa, nämä ravinteet olisi lisättävä maahan. Ravinnepoistumat riippuvat voimakkaasti kasvilajista ja satotasosta. Korostetuimmin ero näkyy nurmilla. Nurmisadon myötä kaliumia poistuu moninkertaisesti verrattuna viljoihin, ja lisäksi nurmen kasvilajikoostumus vaikuttaa etenkin kalsiumin ja boorin poistumaan (Taulukko 3).

Ravinnepoistumia voidaan arvioida yksinkertaisesti satotason ja tyypillisten ravinnepitoisuuksien avulla. Ravinnepitoisuuksia on taulukoituna ravinnetaseoppaan (MAVI, 2008) lisäksi kattavasti rehu-analyysitaulukoihin (LUKE, 2014). Lannoitus suunnittelussa ravinnepoistuma voidaan arvioida suunnitellun satotason avulla. Suunniteltuna satotasona voidaan käyttää esimerkiksi ”optimistista keskiarvoa”, jossa viimeisen 7 vuoden sadoista poistetaan kolme heikointa vuotta (Shober ja Taylor, 2015).

Taulukko 3. Kolmen erilaisen nurmisadon ravinnepoistuma (ravinnepitoisuudet Bryson ja Mills, 2015).

	6 t/ha: 60% timotei, 40% englannin raiheinä	6 t/ha: 20 % timotei, 40 % englannin raiheinä, 30 % puna-apila, 10 % sinimailanen	11 t/ha: 20 % timotei, 40 % englannin raiheinä, 30 % puna-apila, 10 % sinimailanen
N	161	217	398
P	17	24	44
K	126	145	266
Ca	22	69	127
Mg	15	20	37
S	19	20	37
Fe	1,4	1,64	3
Mn	0,3	0,34	0,6
B	0,1	0,17	0,3
Cu	0,2	0,14	0,3
Zn	0,3	0,28	0,5
Mo	0,004	0,006	0,010

Ravinnepoistuma (*removal*) ei kuvaa koko ravinteiden ottoa (*uptake*). Vaikka esimerkin 4 t vehnä-sato poistaa vain 20 kg kaliumia, sato ottaa noin 110 kg kaliumia kasvuunsa (IPNI, 2014). Ylimäärä varastoituu väliaikaisesti kasvin korsiin ja juuristoon ja vapautuu vähitellen takaisin maaperään. Ravinteiden ottomääriä on taulukoitu pääravinteiden osalta mm. IPNI:n tietokantaan (IPNI, 2014). Hivenravinteiden osalta ravinteiden ottoa voi arvioida koko punnitun biomassan ja ravinteiden tyypillisten pitoisuuksien avulla. Tarkemman arvion saa punnitsemalla koealat ja määrittämällä niistä rehuanalyysillä ravinnekoostumukset.

Miten tätä sovelletaan lannoitus suunnittelussa? Lannoitus suunnittelussa tulisi huomioida kasvin ravinteiden otto sekä sadon mukana poistuva ravinnemäärä. Näitä ei voi kuitenkaan käyttää suoraan lannoitus määrinä, sillä merkittävä osa ravinteista on peräisin muusta kuin lannoituksesta (Karklins ja Ruza, 2015; Olson ym., 1982). Toisaalta jos maaperän ravinnepitoisuuksia halutaan ylläpitää nykytasolla, lannoituksen pitäisi palauttaa vuosittain poistuva ravinnemäärä. Tämä on tärkeintä huomioida ravinteilla, joilla ei ole suuria ravinnevarastoja maassa (boori, rikki, joissain tapauksissa sinkki, kupari ja mangaani) ja joiden pitoisuudet ovat tarkasteltavalla lohkolle melko alhaisia.

Ravinnepoistuman lisäksi kasveista voidaan määrittää niiden ravinnepitoisuudet kasvukauden aikana. Mittaustuloksia voidaan verrata taulukkoarvoihin ja arvioida ovatko kasvuston pitoisuudet riittäviä. Tämän avulla voidaan hienosäätää kasvin ravitsemusta jaetun lannoituksen avulla (Bryson ja Mills, 2015). Jaetussa lannoituksessa vain osa lannoituksesta annetaan peruslannoituksena kasvukauden alussa ja loput lannoituksesta lisätään kasvuston ravinteiden oton perusteella. Menetelmä soveltuu parhaiten ravinteisiin, joita voidaan lisätä lehtilannoituksella (N, S, Mg, Ca, Cu, Zn, Mn, B) tai jotka ovat nopeasti kasvin käytettävissä maahan lisäyksen jälkeen (N, K, S, Mg, Ca, B). Menetelmän luotettavuuden varmistamiseksi kasvinäytteet on otettava kasvin tietyssä kasvuasteessa ja näytteen on oltava edustava (riittävästi näytepisteitä, esim. 5 pistettä/lohko, 10 kasvia joka pisteestä, poikkeavat kasviyksilöt ja pellon kohdat jätetään tarkastelun ulkopuolelle) (Bryson ja Mills, 2015).

Yleisemmin jaettua lannoitusta käytetään typen täsmälannoituksessa. Menetelmässä typpipitoisuudet mitataan lohkolta joko kaukokartoituksena, lennokilla tai traktoriin kiinnitettävällä sensorilla. Saa-dun kartan perusteella lisälannoitus kohdennetaan lohkolle arvioidun typpipitoisuuden perusteella (Tremblay ym., 2008). Typpipitoisuus arvioidaan yleensä lähi-infrapunamenetelmillä (ns. NDVI arvot). Viime aikoina karttoja on tuotettu Sentinel 2 –satelliittiaineiston perusteella (Cropsat, Sentinel Playground). Sentinel aineisto päivittyy neljän päivän välein, joten sen avulla voi myös tarkastella kasvuston kehittymisen dynamiikkaa kasvukaudella.

Suurin osa ravinnetilan kartoituksesta on perustunut typen määrien arviointiin. Kaikkien ravinteiden arviointiin kasvustosta ei ole vielä kehitetty luotettavia menetelmiä, joten lohkon sisäinen vaihtelu eri ravinteiden osalta on vielä pääosin tuntematonta. Pikamenetelmien soveltuvuudesta on tehty arvioita

(Mattila ym., 2018). Kasvinravitsemuksessa on muitakin avoimia kysymyksiä. Esimerkiksi ravinteiden yhteisvaikutukset ovat osin tuntemattomia ja osa kasvianalyysissä tunnistetuista ravinnepuutteista voi olla peräisin muiden ravinteiden ylimääristä (Römheld, 2012). Samoin kierrätyslannoitteiden sisältämien kasvunestojen (biostimulantit) vaikutuksista on tehty runsaasti tutkimusta (Calvo ym., 2014), mutta niiden vaikutuksen ennustaminen ei ole suoraviivaista (Celestina ym., 2019).

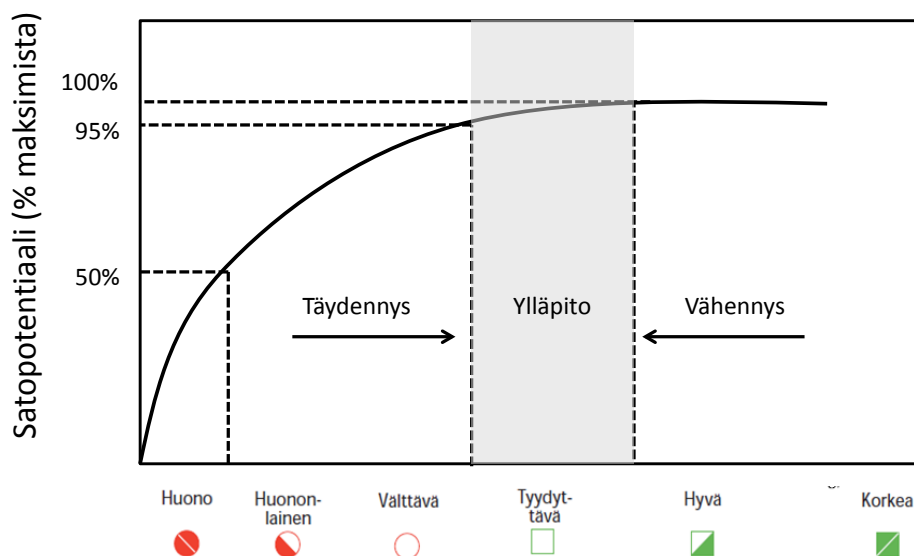
Viljavuusanalyysin tulkinta

Muiden kuin typen osalta maaperän kykyä tarjota ravinteita kasville arvioidaan viljavuusluokkien avulla (*index system*). Viljavuusluokat muodostetaan yleensä satovasteen perusteella. Kun ollaan hyvässä viljavuusluokassa, lisälannoituksella ei saada satovastetta. Tyydyttävässä viljavuusluokassa satovaste on pieni ja lannoitus ei yleensä ole kustannustehokasta (Kuva 4). (Hatfield, 1972)

Viljavuusanalyysin tuloksia voidaan soveltaa lannoitussuunnitteluun jakamalla viljavuuden ja sato-tason välinen suhde kolmeen osaan: alle tyydyttävän, tyydyttävä-hyvä, ja korkea (Hochmuth ja Hanlon, 2010; Olson ym., 1982). Tyydyttävä-hyvä tasolla lisätään vuosittain ravinnepoistuman verran ravinteita, jotta tasot pysyisivät tavoitetasolla. Korkealla tasolla lannoitetaan vähemmän kuin sadon mukana poistuu, jotta pitoisuudet laskisivat. Alhaisella tasolla lannoitusta lisätään yli ravinnepoistuman, jotta maahan kertyisi ravinteita ja pitoisuudet nousisivat.

Tarvittavaa ravinneylimäärää voidaan arvioida muuttamalla mitatut pitoisuudet massayksiköihin. Suomalaisessa viljavuusanalyysissä pitoisuudet ilmoitetaan painona tilavuusyksikköä kohden (g/l, tai mg/l). Jos tarkastellaan 0,2 m syvyistä ruokamultakerrosta, peltohehtaarin tilavuus on $0,2 \text{ m} \times 10\,000 \text{ m}^2 = 2000 \text{ m}^3$. Tällöin yhden $\text{mg/l} = \text{g/m}^3$ muutos maaperässä vastaa $2000 \text{ m}^3 \times 1 \text{ g/m}^3 = 2000 \text{ g}$ muutosta ravinteiden määrässä.

Tarkastelu toimii hyvin, jos viljavuusanalyysin tulokset vastaavat pellon ravinneilmääriä. Virhelähteitä on kuitenkin sekä näytteenotossa että analyysimenetelmissä. Jos näytteet on otettu edustavasti (15–20 näytepistettä, samanlainen maa-alue, vakiosyvyys), ne kuvaavat lohkon tilannetta. Analyysimenetelmät eivät kuitenkaan kuvaa koko ravinnetilannetta, vaan ne on yleensä suunniteltu ennustamaan kasville käyttökelpoisten ravinteiden määrää. Tämän johdosta ravinteiden lisäyksen jälkeen maaperän analysoidut pitoisuudet eivät nouse suoraviivaisesti (Matula ja Pechová, 2005). Suomalaisessa viljavuusanalyysissä tarvitaan välttävällä viljavuudella noin 100 kg/ha ylimäärä savimaan fosforitaseessa, jotta mitatut pitoisuudet kasvaisivat 1 mg/l yksikköä (laskettu Luonnonvarakeskuksen fosforilaskurin perusteella (LUKE, 2015)). Suurimmat virheet taselaskennassa ovat fosforin ja kaliumin osalta, sillä niiden varastot maaperässä ovat suuret. Viljavuusanalyysin tulkinnassa voi olla mielekästä hyödyntää näiden ravinteiden osalta myös varastoravinnetuloksia (Virkajärvi ym., 2014).



Kuva 4 Viljavuusluokkien ja sadon välinen suhde.

Viljavuusanalyysitiedot ovat käytettävissä periaatteessa jokaiselta suomalaiselta peltolohkolta. Suomalaiset viljelytukehdot velvoittavat ottamaan maanäytteen vähintään 5 vuoden välein ja vähintään jokaista alkavaa 5 ha peltoalaa kohden (lisäksi vähintään yksi näyte on otettava joka lohkolta, jos lohkon koko on vähintään 0,5 ha). Näytteenottotapa ja analysoidut ravinteet eivät kuitenkaan aina vastaa lannoitus suunnittelun tarpeita, sillä kiinnostuksen kohteena on lähinnä ollut fosforiraja-arvojen määrittäminen ja toisaalta lohkon kalkitustarpeen arviointi. Tyypillisesti maanäytteistä analysoidaan vain pH, P, K, Ca, Mg ja S. Viljavuusanalyysiä voi kuitenkin täydentää hivenravinteiden (Cu, Zn, B) osalta. Eurofins Tuloslaarin tietojen perusteella merkittävällä osalla analysoiduista näytteistä on puutetta näistä ravinteista (ja vain osassa näytteistä oli arvioitu nämä ravinteet) (Taulukko 4, Eurofins, 2012).

Taulukko 4. Hivenravinteiden ja rikin puutteet eri näytteissä ja analysoitujen ravinteiden osuus kaikista näytteistä (Eurofins, 2012).

Ravinne	Analysoitu osuus kaikista näytteistä (%)	Puutetta havaittu analysoiduista näytteistä (%)
Cu	43 %	29 %
Zn	43 %	40 %
Mn	43 %	56 %
B	6 %	55 %
S	99 %	30 %

Tyypillisten viljavuusanalyysitulosten lisäksi maasta voidaan arvioida myös esimerkiksi molybdeeniä, kobolttia, liukoista piitä tai seleeniä. Näiden analysointi onnistuu edullisimmin lähettämällä maanäytteet Yhdysvaltoihin (esim. *Logan Labs*, *Spectrum analytic*, *Midwest Laboratories*), jossa uutto tehdään Mehlich-3 uuttoneesteellä, joka uuttaa tyydyttävästi useimmat ravinteet kerralla (Matula, 2009).

Hivenravinteiden lisäksi maanäytteen perusteella voidaan tehdä ennuste typen vapautumisesta kasvien käyttöön (Kinnunen ym., 2018). Suomessa typen vapautumista on arvioitu lähinnä multavuusluokkien perusteella, mutta maaperästä vapautuvaksi arvioitujen typpimäärien on arvioitu alhaisiksi. Esimerkiksi multavuuden kasvu 1-2 %:sta (vähämultainen) tasolle 6-12 % (runsasmultainen) vähentää typpilannoitusrajoja vain 10 kg N/ha. Vastaavuus maaperän multavuuden ja mikrobiologisen typen vapautumisen välillä on todettu heikoksi 24 OSMO lohkon otannalla, jossa multavuutta paremmin typen vapautumista vastasi maaperän kokonaistyyppivaranto (Mattila ja Rajala, 2017). Sama tulos on saatu myös liettualaisissa 9 vuoden peltokokeissa, joissa todettiin viljelykasvien hyödyntävän noin 2-3 %

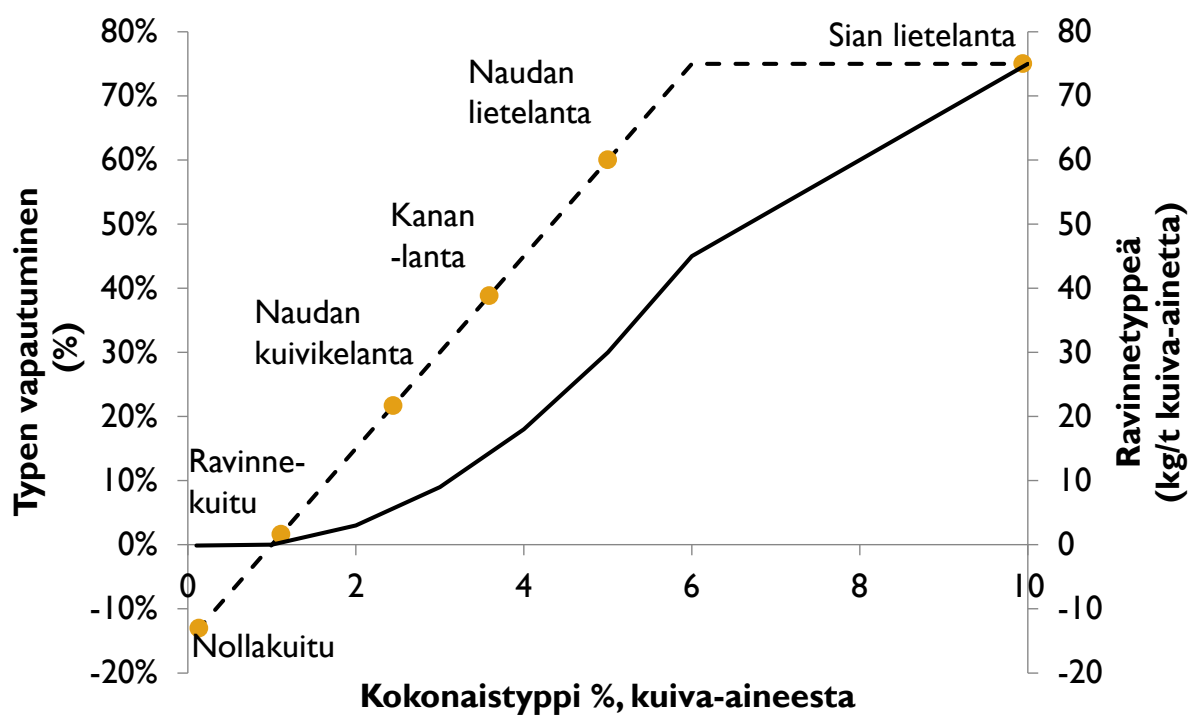
kokonaistypestä (Karklins ja Ruza, 2015). Eri arvioiden perusteella maaperästä voi vapautua kuitenkin luokkaa 80-200 kg N/ha lohkokosta riippuen (Kinnunen ym., 2018). Keskeisin selittävä tekijä maaperästä vapautuvalle typelle on maaperän mikrobiologinen aktiivisuus (Haney ym., 2018).

Maaperän mikrobiologiseen aktiivisuuteen pohjautuvia arvioita typen vapautumisesta tehdään sekä kotimaassa (Eurofins Viljavuuspalvelu Oy) että Yhdysvalloissa (esim. *Woodsend Soil Health Tool*). Tulosten sovellettavuus Suomen olosuhteissa on kuitenkin epävarmaa. Varmimman arvion kasvukauden typen vapautumisesta kasvien käyttöön saa nollaruudulla, eli jättämällä peltoon alueen jolle ei tehdä typpilannoitusta ja määrittämällä alan sadon. Jos käytössä on viherpeitettä ja yhteytystä mittaavat anturit (Green Seeker ja N-sensor), niiden avulla saa arvion tehtyä nopeasti ja melko luotettavasti (Blackert, 2018).

Kierrätyslannoitteiden lannoitusarvo ja typen vapautuminen

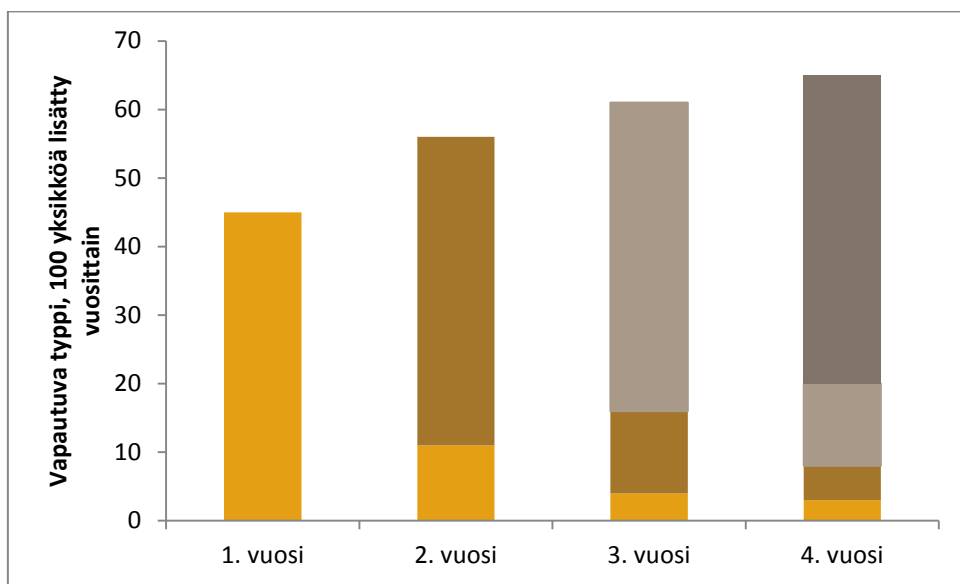
Suurin osa kierrätyslannoitteiden ja lannan lannoitusarvon tutkimuksesta on keskittynyt typpeen. Jotta kierrätyslannoitteita voitaisiin käyttää väkilannoitteiden korvaajana, on selvitetävä, paljonko typpeä vapautuu kasvukaudella kasvien käyttöön.

Eloperäisistä lannoitevalmisteista vapautuu typpeä ensimmäisen kasvukauden aikana määrä, joka on ennustettavissa typpipitoisuuden avulla (*plant available nitrogen*, PAN, Sullivan ym., 2010) (Kuva 5). Alhaisilla typpipitoisuuksilla kaikki lannoitteen typpi (myös lannoitteesta alun perin ollut liukoinen typpi) sitoutuu hajotustoimintaan ja kasvavaan mikrobimassaan, ja esimerkiksi nollakuitu sitoo typpeä ympäristöstään. Vasta noin 1 % kokonaistyppipitoisuudesta alkaen ravinteita alkaa vapautua. Noin 4 % typpipitoisuudella puolet kokonaistypestä on kasveille käyttökelpoista ja typen vapautuminen tasaantuu noin 80 prosenttiin yli 6 % typpipitoisuuksilla.



Kuva 5. Typen vapautuminen kierrätyslannoitteesta riippuu lisätyn lannoitteen typpipitoisuudesta (typen vapautuminen on kuvattu katkoviivalla, ja asteikko vasemmalla akselilla). Ensimmäisenä kasvukautena käytettävissä oleva ravinnemäärä (kg N/t) on kuvattu yhtenäisellä viivalla, ja asteikko on oikealla akselilla. (Sullivan ym., 2010)

Loput tyypestä vapautuu vähitellen myöhempinä vuosina. Toistuvassa käytössä lannoitusvaikutus kertyy, kun eri vuosina tehtyjen lannoitusten vaikutukset lisätään toisiinsa. Ilmiötä tarkastellaan jäännöstypen avulla (*residual nitrogen fertilizer value*, RNFV) (Kuva 6).



Kuva 6. Perinteinen tapa arvioida jäännöstypen arvo perustuu hajoamissarjaan, jossa tietyssä vuonna lisätystä typpilannoitteesta vapautuu typpeä useana vuonna, mutta joka vuosi vähemmän kuin edellisinä vuosina. Jos lisäys toistuu vuosittain, vaikutukset lasketaan yhteen. Pitkäaikaisen lannan lisäyksen vaikutukset voivat kestää vuosikymmeniä.

Arviot jäännöstypen määrästä vaihtelevat: Missourin yliopisto arvioi lisäysvuoden jälkeiselle vuodelle 23 % kokonaistypestä lietalannalle, 16 % kuivalannalle ja 13 % kananlannalle (Lory ym., 2007). Toisessa katsauksessa lannan tyypestä vapautui keskimäärin 13 % seuraavana vuotena, 8% sen jälkeen, 6% tämän jälkeen ja lopulta 3 % vuosittain (Schröder ym., 2013). Vaihtelu lantalajeittain on kuitenkin suurta, alinta tyyden vapautuminen oli kompostoidulla karjanlannalla ja nopeinta lietalannalla (Schröder ym., 2013). Isotooppimerkityllä tyypellä on arvioitu karjan kuivalannasta vapautuvan 9-12 % tyydestä toisena vuotena ja 3-5 % kolmantena (Cusick ym., 2006). Useimmat jäännöstyyppitarkastelut arvioidaan vain kolmen vuoden jaksolle. Joissain tapauksissa lopun tyyden oletetaan vapautuvan samaa tahtia maaperän orgaanisen tyyden kanssa (noin 0,7 % vuosittain Ruotsissa) (Schröder ym., 2013).

Tyyden lisäksi eri kierrätyslannoitteet sisältävät myös muita ravinteita. Mikäli niitä käytetään pelkinä typpilannoitteina, se johtaa nopeasti muiden ravinteiden kertymiseen. Kananlanta on hyvä esimerkki kierrätysravinteiden typpilannoitusvaikutuksesta ja sen ongelmista. Jos kananlannan avulla halutaan korvata 70 kg typpilannoitusta, ja 40 % kananlannan tyydestä vapautuu (kuva 5), niin tarvitaan esimerkiksi 175 kg kokonaistypeä. Määrä on suurempi kuin nitraattiasetuksen sallima vuotuinen levitysmäärä (170 kg N/ha, 1250/2014). Osa kokonaistypestä vapautuu kasvukauden ulkopuolella ja voi johtaa ravinnepäästöihin. Samalla levitysmäärällä fosforia tulisi noin 80 kg/ha, mikä on noin viisinkertainen fosforin lannoitusrajaan nähden välttävällä viljavuusluokalla. Tämä ei ole tehokasta resurssien käyttöä. Parempi tapa käyttää kierrätyslannoitteita on arvioida niillä saavutettava hyöty kokonaisvaltaisesti. Kierrätysravinteiden avulla voidaan lisätä maan pää-, sivu- ja hivenravinnevaroja ja vähentää muuta lannoitusta, mikä tuo säästöjä lannoitussuunnittelussa. Ravinteiden lisäksi kierrätyslannoituksella voidaan saavuttaa hyötyjä niiden kalkitusvaikutuksen ja maan multavuuden lisäyksen avulla.

Lannoituksen vaikutus maan multavuuteen, happamuuteen ja kalkitustarpeeseen

Ravinteiden lisäksi etenkin eloperäisellä lannoituksella voidaan vaikuttaa merkittävästi maan ominaisuuksiin. Eloperäisen aineen lisäys maahan lisää maan murustuvuutta ja murukestävyyttä (Ravander ym., 2019). Lisäksi se on keino lisätä maan multavuutta (Chenu ym., 2019) ja sitä kautta biologista aktiivisuutta, maan rakennetta, kationinvaihtokapasiteettia sekä veden pidätyskykyä (Celestina ym., 2019). Lannoituksella on myös merkittävä vaikutus kalkitukseen (Harmsen ym., 1990; Mattila ja Rajala, 2018) ja monet kierrätyslannoitteet poikkeavat ylläpitokalkitustarpeeltaan selvästi väkilannoitteista.

Monien kierrätyslannoitteiden mukana maahan tulee myös orgaanista ainetta, jonka hajoaminen muuttaa pH:ta. Hajoamisreaktioissa on useita peräkkäisiä prosesseja (hydrolyysi, dekarboksylaatio, nitrifikaatio), jotka vaikuttavat happamuuteen vastakkaisin tavoin. Orgaanisen aineen hajoaminen toimii kalkituksen tavoin eli kuluttaa maasta protoneja ja vapauttaa hiilidioksidia (Yan ym., 1996). Toisaalta esimerkiksi vapautuneen aminotyperen muuttuminen nitraatiksi tuottaa protoneja ja ravinteiden huuhtoutuminen vie maasta kationeja. Lisäksi orgaaninen aine kykenee pidättämään protoneja kationinvaihtopinnoille ja vaikuttamaan siten maaveden happamuuteen (Mokolobate ja Haynes, 2002). Vaikka orgaanisen aineen hajoamisen vaikutusta on vaikea selittää teoreettisesti, sen on havaittu vastaavan hyvin lisätyn aineen kationien ja anionien suhdetta (Meda ym., 2001; Mokolobate ja Haynes, 2002; Pocknee ja Sumner, 1997).

Lannoitteiden vaikutusta ylläpitokalkitukseen arvioidaan yleisesti kationien ja anionien määriin pohjautuvalla Pierre-Sluijsmanin kaavalla (Harmsen ym., 1990). Siinä oletetaan anionien huuhtoutumisen vähentävän maan emäksisyyttä ja toisaalta kationien lisäämisen lisäävän maan emäksisyyttä. Kationisten (Ca, Mg, K, Na) ja anionisten (P, N, S) ravinteiden määrien avulla voidaan arvioida lannoituksen vaikutusta ylläpitokalkituksen määriin. Esimerkiksi naudon lietelanta on lievästi kalkitseva, mutta mädätysjäännökset voivat olla happamoittavia (Taulukko 5). Vaikutus riippuu ennen kaikkea tyyppien käyttökelpoisuudesta. Mitä enemmän tuotteessa on tyyppiä (ja joissain tapauksissa rikkiä ja fosforia) suhteessa muihin ravinteisiin, sitä enemmän se tarvitsee ylläpitokalkitusta.

Taulukko 5. Eri ravinteiden vaikutus maaperän happamoitumiseen ja sitä vastaavaan ylläpitokalkitustarpeeseen kalsiittikalkkina ilmoitettuna (Harmsen ym. 1990; muunnettu kalsiittikalkiksi, Mattila ja Rajala 2018).

	Kalkitusvaikutus kg/kg	Gasum Voimakas	Gasum Mo- niravinne	Naudan lietelanta	Soilfood Ravinnekuitu
Fosfori P	1,83	3,6	0,6	0,5	0,7
Kalium K	-1,45	5,4	0,8	2,8	0,3
Kalsium Ca	-2,8	1,3	0,2	0,9	22,7
Magnesium Mg	-4,64	0,3	0,02	0,5	-
Rikki S	3,5	43	0,1	0,3	1,7
Kloori	1,6	-	-	-	-
Natrium	-2,43	-	-	-	-
Käyttökelpoinen typpi N (kg/t)	2	18	4	1,7	0,05
Kalkitustarve kg/tn		180	8	-3	-60
Kalkitustarve tyyppillisellä käyt- tömäärällä kg/ha		900	160	-90	-2000

Orgaanisen aineen lisäyksen vaikutukset maan hiilitaseeseen voidaan arvioida, jos tiedetään orgaanisen aineen kemiallinen koostumus ja pystytään arvioimaan koostumuksen hajoamisnopeudet (Chenu ym., 2019; Lashermes ym., 2009). Osa orgaanisesta aineesta hajoaa hyvin nopeasti, loppu hajo-

aa hitaammin, vastaten maan orgaanisen aineen hajoamisnopeuksia. Hitaasti hajoavaa osuutta kutsutaan yleensä ”humustuneeksi” eli osuudeksi, joka jää lisäämään maaperän multavuutta.

Maanparannusaineiden hajoamismääriä on arvioitu Suomessa MAHTAVA-hankkeessa. Tyypillisesti noin 30-40 % maanparannusaineiden hiilestä hajoaa hitaammin. Hajoamisosuus on samaa luokkaa juurilla, mutta maanpäällisillä kasvintähteillä pysyvämpää hiiltä on vain noin 20 % (Salo, 2018). Yleisesti ottaen, mitä pidemmälle hajotettua orgaaninen aines on maanparannusaineessa, sitä hitaammin se hajoaa maaperässä. Esimerkiksi kompostit ja mädätteet hajoavat hitaammin kuin tuore lanta tai nollakuitu (Salo, 2018).

Koska maanparannusaineissa on usein runsaasti kosteutta, tarvitaan suuria lisäysmääriä maan multavuuden nostoon. Jos maahan lisätään 40 märkätönniä maanparannusainetta, jossa on 20 % kuivaainetta, kuiva-aineesta 60 % on orgaanista ja tästä pysyvämpään muotoon jää 40 %, ja hiilen osuudeksi orgaanisesta aineesta oletetaan 50 %, niin multavuushiilen muutos on $40\,000\text{ kg/ha} \times 20\% \times 60\% \times 40\% \times 0,5\text{ kg C/kg} = 960\text{ kg C/ha}$. Vertailun vuoksi 1 % multavuuden (OM) nosto ruokamultakerroksessa vastaa hiilen painoltaan $2000\text{ t maata/ha} \times 1\% \text{ OM} \times 0,58\text{ kg C/kg OM} = 11\,600\text{ kg C/ha}$. Multavuuden merkittävä nosto vaatii siis toistuvaa ja runsasta hiilen lisäystä maahan. Jos tavoitteena on nostaa maaperän multavuutta, maanparannustuotteen valinnassa on syytä huomioida:

- kuiva-ainepitoisuus
- orgaanisen aineen osuus kuiva-aineesta
- orgaanisen aineen hajoamisnopeus.

Toisaalta viimeaikainen tutkimus esittää, että myös hajonneeksi oletettu osuus lisätystä orgaanisesta aineesta voi lisätä maan multavuutta lisäämällä maan mikrobitoimintaa (Liang ym., 2017). Mikrobit muodostavat maahan hiiltä olomuotoihin, jotka hajoavat hitaasti. Nopeasti hajoavan orgaanisen aineen lisääminen maahan voi lisätä mikrobiaktiivisuutta ja sitä kautta multavuuden kertymistä (Chenu ym., 2019) sekä lisätä maan murukestävyyttä (Ravander ym., 2019). Tällä hetkellä helposti hajoavan hiilen hyötyjen huomiointiin lannoitus suunnittelussa ei ole selviä menetelmiä, mutta niitä kehitetään aktiivisesti (Celestina ym., 2019).

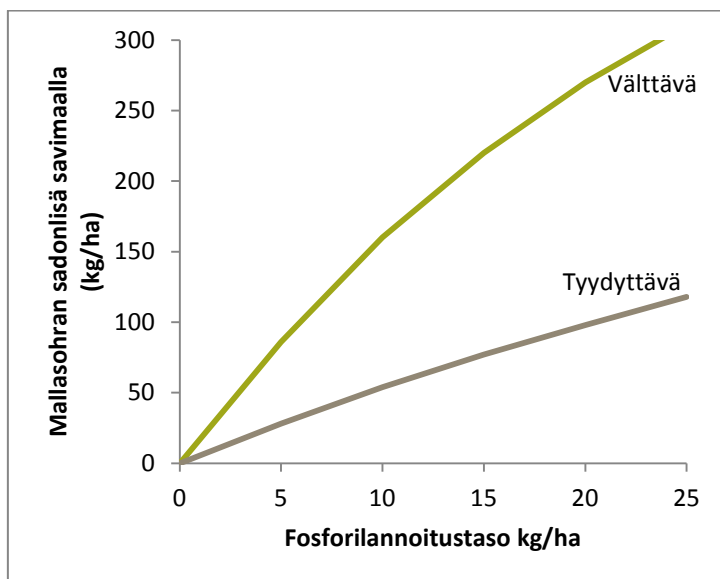
Lähestymistapoja lannoituksen optimointiin

Kun lähtötiedot on koottu, ne pitää vielä yhdistää lohkoittaiseksi lannoitus suunnitelmaksi. Yhdistäminen voidaan tehdä hyvin monella eri tavalla ja yhdistämistapojen valinta vaikuttaa lopputulokseen. Tässä luvussa esitellään eri lähestymistapoja mahdollisimman kustannustehokkaan lannoituksen suunnitteluun.

Kustannus-hyöty-analyysi ja kustannustehokkaimpien ravinnelähteiden tunnistaminen

Jos lannoitukselle on saatavissa satovastekäyrä, joka kuvaa saavutettua satoa eri lannoitustasoilla, sen avulla voidaan arvioida lannoituksen kustannuksia ja hyötyjä. Suomessa tätä lähestymistapaa on sovellettu LUKEn fosforilaskurissa (LUKE, 2015) (Kuva 7). Periaate on yksinkertainen: jokainen lisälannoitusyksikkö tuottaa edellistä pienemmän sadonlisäyksen, ja kun lisälannoituksen kustannus on suurempi kuin sadonlisäyksen hyöty, niin lannoitusta ei kannata enää lisätä. Lisälannoituksen hyödyt riippuvat viljellystä sadosta, lannoitteiden arvosta sekä maan viljavuudesta. Mitä suurempi on lisäsadon arvo suhteessa käytettyjen lannoitteiden arvoon, sitä suuremmat lannoitusmäärät ovat kannattavia. Jos sadon arvo ja lannoitteiden arvo on selvillä, suositus voidaan kiteyttää kasvin lannoitus suositukseksi eri viljavuusluokille. Lähestymistapa tunnetaan riittävän ravinnetason lähestymistapana (*sufficiency level of available nutrient, SLAN*) (Olson ym., 1982; Weil ja Brady, 2016).

Satovastekäyrien ongelmana on se, että samaan aineistoon voidaan sovittaa hyvin erilaisia satovastekäyriä, esimerkiksi typen osalta eri käyrät tuottivat optimilannoitustasoja välillä 128-379 kg N/ha (Cerrato ja Blackmer, 1990). Yleisesti ottaen malli, jossa oletetaan lineaarinen satovaste tiettyyn rajaan saakka ja sen jälkeen tasainen sato, kuvaa aineistoa yhtä hyvin kuin toisen asteen yhtälö, mutta tuottaa paljon alempia optimilannoitustasoja (Weil ja Brady, 2016).



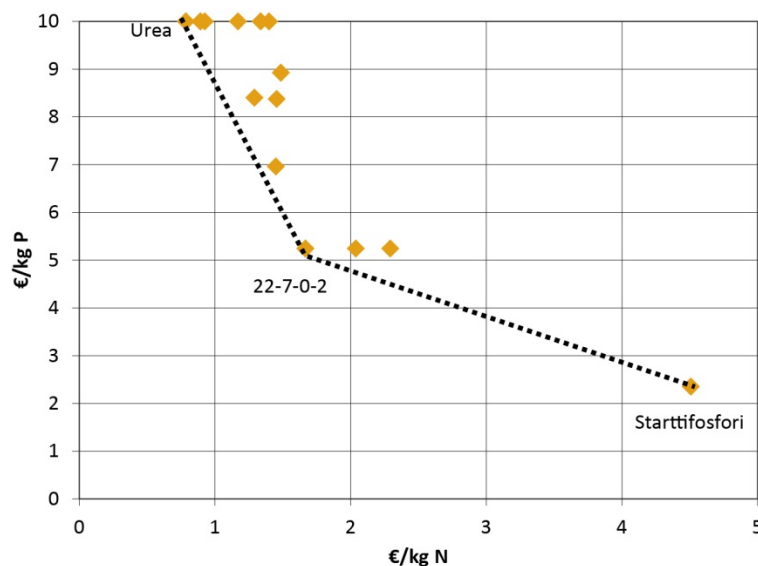
Kuva 7. Fosforilannoituksen satovaste mallasohralla savimaalla kahdella eri viljavuustasolla Fosforilaskurin mukaan (LUKE, 2015).

Kun taloudellisesti kannattavin lannoitustaso on saatu määritettyä, on vielä valittava lannoitelähde. Maataloudessa on käytettävissä runsaasti erilaisia vaihtoehtoja samojen ravinteiden saamiseksi peltoon ja eri ravinnelähteiden hinta vaihtelee runsaasti. Toisaalta eri ravinnelähteissä tulee usein samalla monia ravinteita sekä joissain tapauksissa viljelyn kannalta haitallisia aineita (kadmium, natrium, joissain tilanteissa fosfori). Tällaisessa tilanteessa eri lannoitteiden keskinäistä tehokkuutta voidaan vertailla DEA-tehokkuusanalyysillä (*data envelopment analysis*). Menetelmässä esimerkiksi lannoitteen ominaisuudet luokitellaan kustannuksiin (haitat) ja hyötyihin ja lasketaan näiden suhdelukuja ja yhdistelmiä. Vaihtoehdot, jotka ovat jonkin yhdistelmän suhteen parhaita luokitellaan tehokkaiksi vaihtoehdoiksi, jolloin jatkossa voidaan tarkastella näiden yhdistelmiä. Menetelmän avulla voidaan suuresta aineistojoukosta karsia kaikkein lupaavimmat vaihtoehdot jatkotarkasteluun. (Cooper ym., 2000)

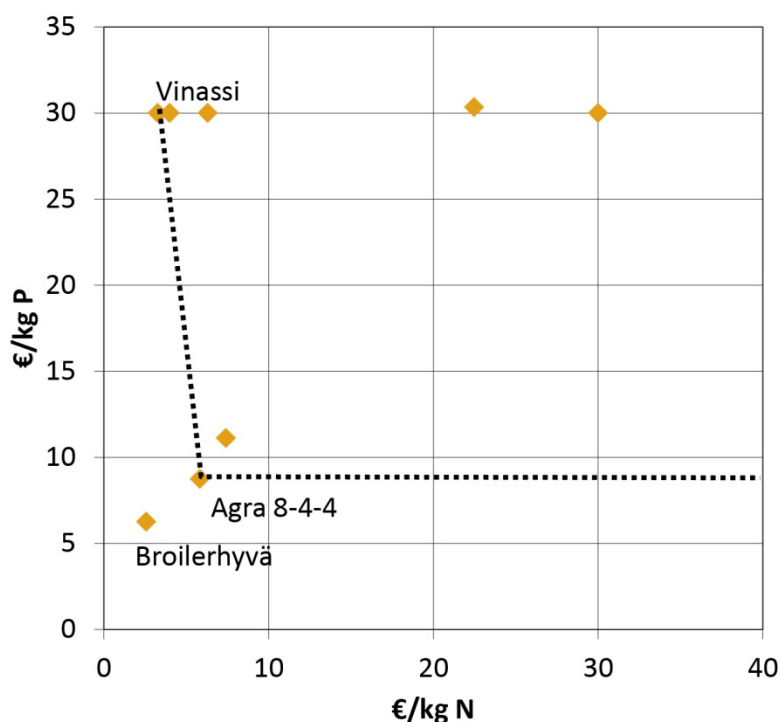
DEA-menetelmää voi havainnollistaa yksinkertaisesti graafisesti, jos tarkastellaan vain kolmea tekijää: kustannuksia, typen määrää ja fosforin määrää. Esimerkiksi julkisista Cemagron väkilannoitteiden ominaisuuksien ja hintojen tiedoista voidaan laskea, että vain kolme lannoitetta on tehokkaita kustannusten suhteen (Kuva 8). Starttifosforissa on edullisin fosforikilo, ureassa on halvin typpikilo ja 22-7-0-2 seoslannoitteessa on halvin näiden yhdistelmä. Yhdistelemällä näitä kolmea lannoitetta saataisiin kustannustehokkaimmin katettua kaikki mahdolliset typen ja fosforin lannoitustasot. Luomulannoitteiden osalta tarkastelu on jossain määrin monimutkaisempaa. Jos huomioidaan typen käyttökelpoisuus (Kuva 5) niin kompostoitu broilerinlanta on edullisin sekä typen että fosforin lähde (Kuva 9). Tarvittava levitysmäärä on kuitenkin suuri. Jos pyritään pienempään levitysmäärään, edullisimmat typpi- ja fosforikilot löytyvät vinassista ja Agra 8-4-4 lannoitteesta.

Periaatteessa DEA analyysiä voidaan laajentaa siten, että siihen sisällytetään vaatimuksia esimerkiksi ravinnesuhteista tai ravinteiden minimi- ja maksimimääristä (Cooper ym., 2000). Menetelmän suurin arvo on kuitenkin siinä, että sen avulla voidaan seuloa suuresta joukosta mahdollisia vaihtoehtoja ne, jotka nousevat optimoinnissa mahdollisiksi vaihtoehdoiksi. Jos lannoite ei ole tehokas minkään ravinteiden tai hyöty-haitta-suhteen perusteella, se ei päädy myöskään optimoinnissa suositelluksi ravinteeksi.

DEA analyysin avulla voidaan tehdä myös hinnoittelua (Cooper ym., 2000). Lannoite saadaan tehokkaaksi, jos sen hintaa lasketaan siten, että se osuu tehokkaimpien vaihtoehtojen väliselle yhdistävälle viivalle. Toinen keino saada lannoitteesta tehokas on lisätä sen ominaisuuksia siten, että se on jonkin ominaisuuden suhteen ainutlaatuinen (esimerkiksi seleenilisäys, ravinteiden vapautumisen ajoitus, tms.).



Kuva 8. Eri väkilannoitteiden kustannustehokkuus typen ja fosforin suhteen. Kustannustehokkaimmat typen ja fosforin lannoitustavat ovat yhdistelmiä kustannustehokkaimmista yksittäisten ravinteiden lähteistä ja sijoittuvat näitä yhdistävälle käyrälle.



Kuva 9. Erilaisten luomukelpoisten lannoitteiden kustannustehokkuus typen ja fosforin suhteen. Kustannustehokkaimmat typen ja fosforin lannoitustavat ovat yhdistelmiä kustannustehokkaimmista yksittäisten ravinteiden lähteistä ja sijoittuvat näitä yhdistävälle käyrälle. Broilerhyvä jätettiin käyrän ulkopuolelle, sillä sen levitysmäärät ovat korkeita ja se muistuttaa enemmän maanparannusainetta.

Maaperän ravinnearvojen pitäminen tavoitetasolla

Kasvin ravinnetarpeeseen ja taloudellisimpaan lannoitukseen pohjaavan lannoituksen rinnalla lannoitusta voidaan suunnitella myös maaperän pitoisuuksien kautta. Tällöin tavoitteena on lannoituksella nostaa maaperän pitoisuudet tasolle, jossa ne riittävät tuottamaan kasville tarvittut ravinteet (suomalaisessa järjestelmässä hyvä viljavuusluokka). Lähestymistapa tunnetaan ylläpitolannoituksena (*Build-up and maintenance*) (Hochmuth ja Hanlon, 2010; Olson ym., 1982). Tällöin vuosittain lisätään lannoitteita sadossa poistuvan määrän verran ja ravinnetase pidetään nollassa. Jos ravinnepitoisuuksia halutaan lisätä, lannoitusta nostetaan. Jos ravinnepitoisuuksia halutaan laskea, lannoitetaan vähemmän kuin sadossa poistuva määrä. Fosforin osalta suurin osa eurooppalaisista suosituksista pohjautuu sadon mukana poistuvan ravinnemäärän lisäämiseen (Jordan-Meille ym., 2012).

$$I = s - (c_{\text{maa}} - c_{\text{tavoite}}) \times y : t \quad (4)$$

missä $c_{\text{maa, tavoite}}$ = mitatut ravinnepitoisuudet maassa ja tavoitepitoisuus
 y = hyötysuhde lisätyn ravinteet ja maaperäpitoisuuden välillä
 t = aikaväli (vuosia), jolla ravinnepitoisuudet halutaan nostaa tavoitteeseen

Periaatteessa ravinnepitoisuuksien nostoon tarvittava ravinneylimäärä y voidaan laskea peltohehtaarin tilavuuden perusteella. Jos oletetaan että peltohehtaarin ruokamultakerros on 2000 m^3 , tällöin yhden mg/l pitoisuusmuutos vaatii 2 kg/ha ravinnelisyästä. Käytännössä yhtälö toimii, jos lisätyt ravinteet pysyvät muodossa, joka näkyy viljavuusanalyysissä. Poikkeamia yhtälöstä on eniten fosforin osalta, sillä suomalainen viljavuusanalyysi mittaa helposti käyttökelpoista fosforia. Viljavuuslukujen muuttaminen vaatii sitä enemmän lisättyä fosforia, mitä alhaisempia pitoisuudet ovat (Luonnonvarakeskus, 2015).

Ravinnepitoisuuksien pitäminen tavoitetasolla johtaa yleensä suurempaan lannoitukseen kuin taloudellisen optimoinnin perusteella tehtävä lannoitus. Lähestymistapa on kuitenkin lähellä taloudellista optimia, mikäli huomioidaan että monissa pelloissa myös varastokaliumia ja -fosforia vapautuu maaperästä, joten kaikkea poistuvaa ravinnetta ei tarvitse lisätä (Hochmuth ja Hanlon, 2010).

Lannoituksen jakaminen kasvianalyysin perusteella

Koska satovastekäyriä ei yleensä ole käytettävissä ja koska maaperän pitoisuuksien perusteella arvioitava kasvien ravinnetila on epätarkka, lannoitus voidaan tehdä myös kasvianalyysin perusteella. Kasvien ravinteiden otto ei ole suoraviivaista kasvukauden aikana, vaan suurin ravinteiden otto keskittyy kahteen kasvuvaiheeseen: korrenkasvun alkuun ja jyvän täyttymiseen. Yleensä kasvianalyysin otto on standardoitu näitä kasvuvaiheita ennen (Bryson ja Mills, 2015; Römheld, 2012). Ottamalla kasvinäytteet esimerkiksi viljoilla pensomisen alussa, ravinnetilannetta voidaan korjata ennen kriittistä korrenkasvua. Toisaalta lippulehtivaiheessa otettu näyte paljastaa ravinnepuutteet ennen jyvän täyttymistä, jolloin ravinnepuutteita voidaan korjata.

Viime vuosikymmeninä tätä lähestymistapaa on täydennetty erilaisilla sensoreilla, joiden avulla mitataan esimerkiksi kasvuston kokonaisbiomassaa tai lehtivihreää (Mattila ym., 2018). Tyypillisesti jaetussa lannoituksessa noin 50-60 % kokonaistypestä annetaan kasvukauden alussa ja loput lisätään kasvianalyysin tulosten perusteella (IPNI, 2019). Jos saatuja mittausrvoja verrataan lohkolle ylilannoitettuun ruutuun, voidaan arvioida, millaisia satovasteita olisi odotettavissa koko lohkon lisälannoituksella. Jos lohkolle jätetään lannoittamaton ”nollaruutu”, sen avulla voidaan arvioida, paljonko ravinteita vapautui kasvin käyttöön.

Kasvi- ja kasvustoanalyysiin pohjautuvissa menetelmissä korvataan ravinteiden vapautumisen etukäteisarviointi kasvin ottamien ravinteiden määrityksellä. Menetelmä kuvaa hyvin kasvin ottamia ravinteita, mutta toisaalta tulos tulee hyvin myöhään. Kun puutosoireet on havaittu, voidaan enää täydentää ravinteita, jotka voidaan levittää hyvin liukoisessa muodossa (N, K, S, B) tai joiden määrät ovat niin pieniä, että ne voidaan levittää lehtilannoituksena (Cu, Zn, Mn, B) (Taulukko 3).

Periaatteiden soveltaminen käytännössä – lannoituslaskuri

Tässä luvussa esitetään tapa yhdistää lannoitus suunnittelun tietolähteitä ja optimointikaavoja lannoitus suunnittelulaskuriksi, joka tuottaa kullekin lohkolle ja viljelyjärjestelmälle kustannustehokkaimman lannoitus suunnitelman käytettävissä olevilla lannoitteilla.

Lähestymistapa

Tässä luvussa kuvataan, miten aiempien lukujen aihepiirejä voidaan soveltaa lannoitus optimointilaskurin suunnittelussa. Periaatteiden avulla on tehty LaPaMa –laskuri, joka on avoimella lähdekoodilla lisensioitu ja ladattavissa osoitteesta (<http://www.luonnonkoneisto.fi/lanoitaparemmiin>). Mallia kehitettiin yhdessä kahden viljelijäryhmän ja ProAgrian neuvojen kanssa keväällä 2019. Laskurin ja tämän kuvauksen tarkoituksena on mahdollistaa lannoitus suunnittelun jatkokehitys.

Lannoitelaskurin lähtökohtana on huomioida pääravinteiden (N, P, K) lisäksi myös sivuravinteet (Ca, Mg, S) ja hivenravinteet (Zn, Cu, Mn, B). Näiden lisäksi huomioidaan lannoituksen vaikutukset myös ylläpitokalkitukseen sekä multavuuden lisäämiseen. Tarkastelun tavoitteena on tukea viljelijän päätöksentekoa lohkokokohtaisen lannoituksen suunnittelussa. Lähtötietoina käytetään lohkon viljavuusanalyysiä sekä kasvien oletettua ravinnepoistumaa. Tämän perusteella lasketaan kullekin lohkolle suositus ravinteiden lisäystarpeesta. Ravinteiden lisäystarpeen perusteella etsitään kustannustehokkain lannoiteyhdistelmä, jolla saadaan toivotut ravinteet lisättyä. Laskurin tavoitteena on maksimoida viljelijän lannoituksella saama hyöty, jota kuvataan orgaanisen lannoituksen kustannusten ja vältetyn muun lannoituksen kustannusten erotuksena:

$$\max (N) = \max (B - C) = \max (B_{\text{ravinteet}} + B_{\text{kalkitus}} + B_{\text{multavuus}} - C) \quad (5)$$

missä:

N = nettohyöty viljelijälle

$B_{\text{ravinteet, kalkitus, multavuus}}$ = hyöty lannoituksesta ravinteiden, kalkituksen ja multavuuden kautta

C = lannoituksen kustannukset.

Lannoituksen hyödyn määrittäminen

Lannoituksella saatavan hyödyn arviointi on vaikeaa. Satovaste-käyriä ei ole yleisesti saatavilla kaikille ravinteille ja niiden yleistettävyyden lohkolta toiselle on kyseenalainen. Välittömän satovasteen lisäksi lannoituksella on vaikutusta maaperän ravinnepitoisuuksiin ja seuraavien vuosien lannoitustarpeeseen. Toisaalta edullisimpien lannoitteiden hinnan arvioitiin kuvaavan ravinteiden taloudellista arvoa, joten mallissa hyötyä laskettiin arvioimaan vältetyn vaihtoehtoiskustannuksen kautta. Tämä kuvasi sitä, kuinka paljon suunnitellulla lannoituksella voidaan välttää muuta lannoitusta.

Kunkin ravinteiden hinta määriteltiin selvittämällä edullisin käytettävissä oleva lannoite, jolla saadaan sama ravinnemäärä kasville (Taulukko 6 ja Taulukko 7). Ravinnelähteiden osalta pyrittiin etsi-

mään tuotteita, joissa on vain yhtä ravinnetta ja joita voidaan lisätä pieniä määriä. Tämän johdosta esimerkiksi luomulannoitteissa erilaiset lantajakeet jätettiin huomiotta.

Eloperäisten lannoitteiden osalta käyttökelpoinen tyyppi arvioitiin Sullivan ym. kaavalla (Sullivan ym., 2010). Lisäksi ylimääräinen jäännöstyyppi arvioitiin 18 % kokonaistypestä (11 % + 4 % + 3 %) (Cusick ym., 2006; Lory ym., 2007; Schröder ym., 2013)

Vaikka käytössä ei ollut satovastekäyriä, yleisesti satovastekäyrien muodon perusteella voidaan päätellä, että lannoituksesta on hyötyä ainoastaan silloin, kun ravinteiden saatavuus on alhaisempi kuin tietty optimitaso (Cerrato ja Blackmer, 1990; Weil ja Brady, 2016). Ravinteiden arvo laskettiin portaittain: kun ravinteiden lisäysmäärä oli alle optimitason, ravinnelisällä oli vaihtoehtokustannusarvo. Kun optimitaso ylitettiin, ravinnelisäyksen arvo oli nolla. Samaa lähestymistapaa sovellettiin myös kalkitus- ja multavuushyödyille. Lannoitteiden kalkitusvaikutuksen ajateltiin korvaavan kalsiittikalkkia ja toisaalta multavuuslisäyksen ajateltiin korvaavan kasvuturvetta.

Taulukko 6. Edullisimmat ravinnelähteet eri ravinteille väkilannoitteina laskettuna.

Ravinne	€/kg	Korvaava tuote
Fosfori P	1,9	Starttifosfori
Kalium K	0,7	Kaliumsuola
Kalsium Ca	0,15	Kalsiittikalkki
Magnesium Mg	0,6	Dolomiittikalkki
Rikki S	0,3	Ammoniumsulfaatti
Kupari Cu	15	Kuparisulfaatti
Sinkki Zn	8	Sinkkisulfaatti
Mangaani Mn	5	Mangaanisulfaatti
Boori B	14	Boorilannoite
Käyttökelpoinen tyyppi N	0,8	Urea
Kalkitusvaikutus €/t	23,8	Kalsiitti
Multavuushiili	0,34	Kasvuturve
Jäännöstyyppi	0,8	Urea

Taulukko 7. Edullisimmat täydennysravinnelähteet eri ravinteille luonnonmukaisessa viljelyssä.

Ravinne	€/kg	Korvaava tuote
Fosfori P	5	Agra 8-4-2
Kalium K	1,2	Kaliumsulfaatti
Kalsium Ca	0,15	Kalsiittikalkki
Magnesium Mg	0,6	Dolomiittikalkki
Rikki S	3,5	Kiseriitti
Kupari Cu	30	Kuparisulfaatti
Sinkki Zn	8	Sinkkisulfaatti
Mangaani Mn	5	Mangaanisulfaatti
Boori B	15	Boorilannoite
Käyttökelpoinen tyyppi N	3	Vinassi
Kalkitusvaikutus €/t	23,8	Kalsiitti
Multavuushiili	0,34	Kasvuturve
Jäännöstyyppi	0,8	Urea

Kasvin ravinnetarpeen arviointi

Kasvin ravinnetarvetta voidaan arvioida ainakin kolmella eri tavalla: satovastekäyrillä, ravinteiden otolla ja ravinnepoistumalla. Koska satovastekäyriä ei ole saatavilla kuin harvoille ravinteille (N ja P) ja koska kokeiden yleistettävyyden on heikko, laskennan pohjaksi otettiin ravinnepoistuma. Ravinteiden otto olisi usein merkityksellisempi mittari, mutta ravinteiden ottoarvoja on saatavilla lähinnä pääravinteille (IPNI, 2014). Lisäksi jo ravinnepoistuman korvaamiseen pyrkivä lannoitus johtaa yleensä yllannoitukseen (Hochmuth ja Hanlon, 2010), joten ravinteiden oton käyttö lannoituksen pohjana johtaisi vielä voimakkaampaan yllannoitukseen.

Ravinnepoistuma voidaan arvioida rehutaulukoiden avulla. Rehutaulukoihin on tilastoitu useiden eri satokasvien ravinnepitoisuudet kuiva-ainetta kohden. Tilastoista puuttuu kasvinravinteista kuitenkin boori, jonka määrä voidaan arvioida kasvianalyysin suositusarvojen perusteella (Bryson ja Mills, 2015).

Laskennan pohjaksi otetaan kasvin vuosittain poistama ravinnemäärä, josta vähennetään kuitenkin maaperästä vapautuvien ravinteiden määrä. Muiden ravinteiden kuin typen osalta, vapautuvien ravinteiden määrä arvioidaan epäsuorasti ravinnetaseen avulla. Toisin sanoen, lannoitussuunnitelma perustuu *build-up and maintenance* ajatukseen, jossa korvataan vuosittain poistuva ravinnemäärä ja mikäli ravinnepitoisuudet maassa ovat alhaiset, lisätään lannoitusta ravinnepitoisuuksien kerryttämiseksi (Hochmuth ja Hanlon, 2010).

Lohkon ravinnevarantojen arviointi

Maa-analyysin viljavuusluokat on kalibroitu siten, että tyydyttävä-hyvä tasolla todennäköisyys lannoituksella saatavalle satovasteelle on alhainen (Hatfield, 1972). Lannoituslaskurin lähtökohtana on lisätä vuosittain poistuvan ravinnemäärän verran ravinteita, jos ravinnepitoisuudet ovat yli tyydyttävän tason. Jos ravinnepitoisuudet ovat alle tyydyttävän tason, lannoitusta lisätään ravinnepitoisuuksien nostamiseksi.

Kalsiumin, kaliumin ja magnesiumin osalta tavoitearvot lasketaan kationinvaihtokapasiteetin ja kationiosuuksien suhteen (Mattila ja Rajala, 2018). Tämän avulla vältetään erilaiset suositusarvot eri maa-lajeille ja saadaan paremmin huomioitua multavuuden ja savipitoisuuden vaihtelut.

Ravinteiden lisäysmäärä lasketaan kaavalla (2) ja oletetaan, että ruokamultakerroksen tilavuus on 2000 m³, jolloin erotus ravinnepitoisuuksissa kerrotaan kahdella jotta saadaan ravinteiden lisäystarve (kg/ha). Esimerkiksi, jos sinkin pitoisuus on 1 mg/l ja tavoitetaso 4 mg/l, lisäysmäärä on $(4-1) \times 2 = 6$ kg/ha. Jos lisäksi sadon mukana poistuu 0,3 kg, kokonaislannoitustaso on 6,3 kg/ha. Jos maaperässä on korkeammat pitoisuudet kuin suositeltu, lisäyslannoitustaso on nolla. (Taulukko 8)

Typen osalta ei ole käytettävissä viljavuusluokkia, joten laskurissa arvioidaan maaperästä vapautuvan typen määrä perustuen esimerkiksi erilliseen maaperäanalyysiin (Kinnunen ym., 2018), aiemmin tehtyihin nollaruutuihin (Blackert, 2018), tai muihin alueella tehtyihin mittauksiin (Karklins ja Ruza, 2015).

Ravinteiden lisäksi laskurissa voidaan määritellä lannoituksen kalkitusvaikutukselle, multavuus-lisälle ja jäännöstypelle tavoitearvot.

Taulukko 8. Esimerkki lannoitussuunnitteluohjelmiston osiosta, jossa määritellään lohko-kohtainen ravinteiden lisäystavoite viljavuusanalyysin ja sadon mukana poistuvan ravinnemäärän avulla

	Lohkolla mg/l	Tavoite mg/l	Erotus tavoit- teeseen mg/l	Ravinteiden poistuma kg/ha	Lisäystavoite kg/ha
Fosfori P	11	10	-1	14	12
Kalium K	200	179	-21	20	-
Kalsium Ca	2000	2 081	81	1	164
Magnesium Mg	230	220	-10	5	-
Rikki S	6,8	13	6	5	17
Kupari Cu	2,2	4	2	0,02	4
Sinkki Zn	1,29	4	3	0,12	6
Mangaani Mn	15	50	35	0,04	70
Boori B	0,6	1	0,4	0,02	1
Typpi N kg/ha	90		-90	79	-

Lannoituksen optimointi

Laskuri rakennettiin lineaariohjelmointimalliksi, joka pyrkii minimoimaan lannoituksen kustannuksia siten, että määritetty ravinnelisyys saavutetaan joko tarkasteltavilla kierrätyslannoitteilla tai vaihtoehtoisella lannoituksella (Taulukko 6 ja Taulukko 7).

$$\begin{aligned} &\min (\mathbf{c}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{c}_2 \mathbf{x}_2) \\ &\text{ehdoilla } \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_1 \leq \mathbf{r} \\ &\quad \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2 \geq \mathbf{l} \\ &\quad \mathbf{x}_1 \geq \mathbf{x}_{\min} \\ &\quad \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \geq 0 \end{aligned}$$

missä

- \mathbf{r} = hallinnolliset ja fysikaaliset reunaehdot (fosforirajat, nitraattiasetus, liukoinen typi, lantasaïliön tilavuus, kadmium, ylikalkitusraja, natrium, luomukelpoisuus, puutarhakasvikelpoisuus)
- \mathbf{l} = ravinnelisyystarve, joka on määritetty kasvin ravinnepoistuman ja maan viljavuuden perusteella sekä minimikalkitus, jäännöstyyppi ja multavuuden lisäystavoitteet
- \mathbf{x}_{\min} = käyttäjän asettama minimilisyys tietyille lannoitteille
- \mathbf{B} = lannoitteiden ominaisuudet
- \mathbf{c} = lannoitteiden kustannukset
- \mathbf{x} = lannoitteiden lisäysmäärät

Vaihtoehtoista lannoitusta \mathbf{x}_2 käytetään tässä ns. *slack* -muuttujana (Bertsimas ja Tsitsiklis, 1997), jonka avulla varmistetaan, että optimointi löytää aina ratkaisun, vaikka tarkasteltavissa lannoitteissa ei olisi kaikkia tarvittavia ravinteita.

Laskenta lisää suunnitelmaan kustannustehokkainta vaihtoehtoa suhteessa lohkon ravinnetarpeisiin, kunnes jokin ravinnetarpeista tulee täytetyksi tai jokin rajoittava reunaehto ryhtyy rajoittamaan lisäystä.

Laskenta on toteutettu siten, että ravinteita voi tulla enemmän kuin määritetyn ravinnelisysmäärän verran, mikäli se on kustannustehokasta jonkin muun ravinteen määrän lisäämiseksi.

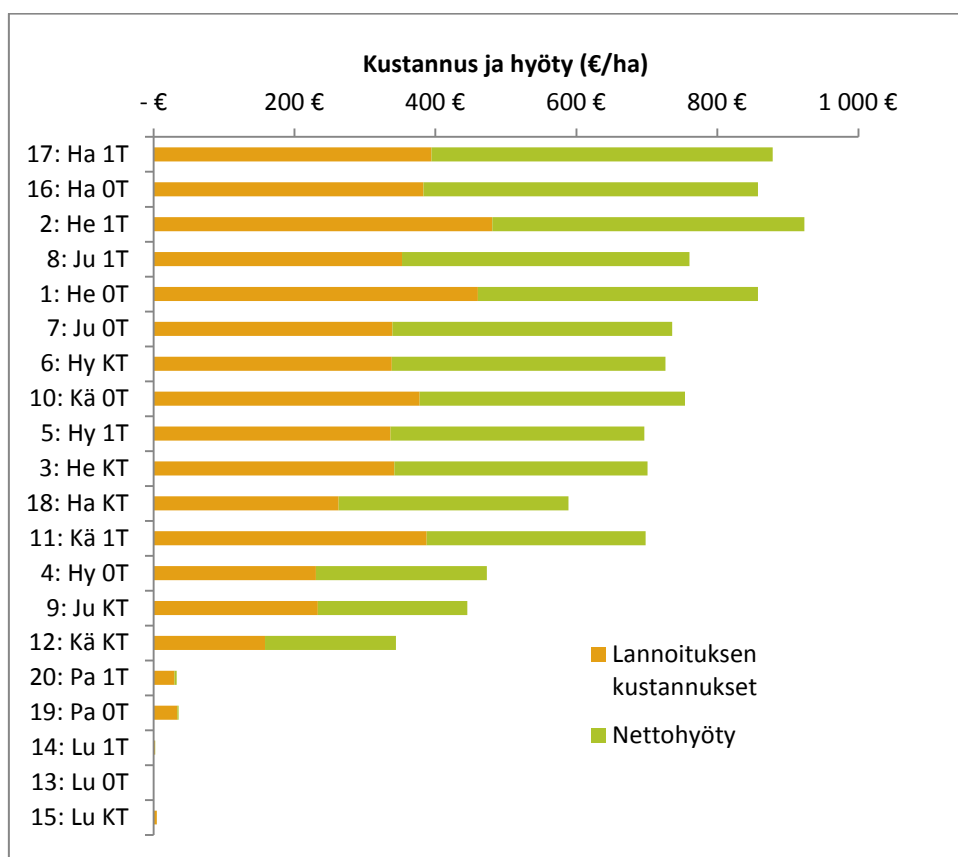
Lineaariohjelmoinnin sivutuotteena (dualiratkaisuna) saadaan jokaiselle rajoitteelle ja reunaehdolle myös ns. varjohinta tai -kustannus, joka kuvaa kyseisen rajoitteen vaikutusta optimiratkaisuun (Bertsimas ja Tsiklis 1997). Tämän avulla voidaan tunnistaa, paljonko eri ravinteet maksavat kustannustehokkaimmassa tapauksessa.

Esimerkkilannoitus suunnitelmat 24 koelohkolle

LaPaMa - laskuria testattiin OSMO-hankkeen 24 koelohkon viljavuusanalyysitiedoilla (Mattila ja Rajala, 2017). Lohkoilla oli yleisesti fosforin puutetta, mutta myös lisäksi hivenravinteiden ja joissain tapauksissa kaliumin ja rikin puutetta. Laskenta tehtiin Soilfood Oy:n kierrätyslannoitevalikoimalla kevään 2019 tiedoilla, mutta lohkojen sijainnin vaikutusta rahtikustannuksiin ei huomioitu. Ravinteiden lisäyksen hyöty laskettiin käyttämällä edullisimpia täydennyslannoitteita. Laskenta tehtiin erikseen luomu- ja tavanomaisilla lannoitteilla (Taulukko 6 ja Taulukko 7). Yksinkertaistuksen vuoksi laskenta tehtiin kaikille lohkoille 5 vuoden ajalle, ravinnepoistuman arviointiin viljelykasvina käytettiin kauraa 3,5 t satotasolla paitsi perunatiloilla perunaa 30 t satotasolla (alhainen satotaso kompensoi kasvinvuorotuksen). Suunnitelmaan määritettiin 50 kg C/ha/vuosi multavuushiilen lisäys, 20 kg/ha jäännöstypen määrä sekä 1 t/ha kalkitustarve.

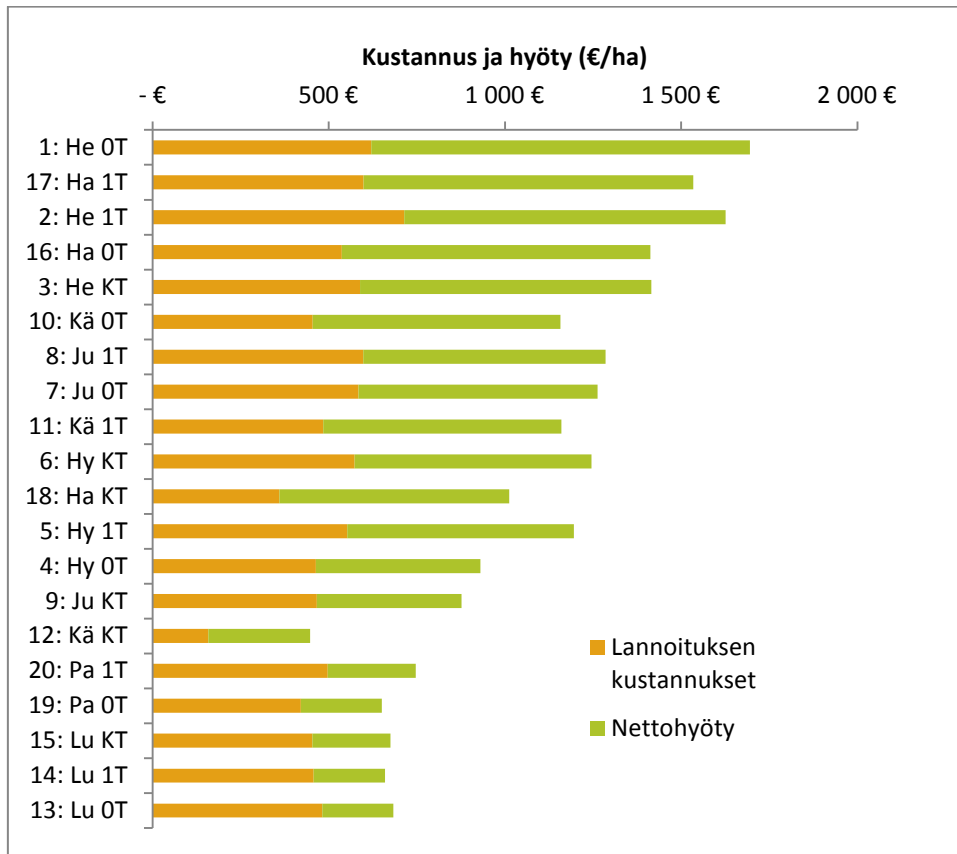
Tulosten perusteella useimmilla lohkoilla on saavutettavissa merkittäviä kustannussäästöjä kierrätyslannoitteiden avulla. Kierrätyslannoituksen kustannukset olivat lohkoista riippuen 0-480 €/ha (keskim. 257 €/ha), mutta lannoitteiden ravinteiden arvo oli 0-800 €/ha (keskim. 431 €/ha) ja kalkitus- ja multavuushyöty oli 0-169 €/ha (keskim. 94 €/ha). Hyötyjen ja kustannusten suhde oli keskimäärin 1,8 €/€ ja lohkoittainen nettohyöty oli keskimäärin 269 €/ha (0-484 €/ha) (Kuva 10). Suurimmat hyödyt olivat lohkoilla, joissa oli sekä kalkitustarvetta, että puutetta hivenaineista, fosforista ja kaliumista (Ha 1, Ha 0, He 1). Tässä tapauksessa PK-hivenkalkki oli kustannustehokas ratkaisu. Pienimmät hyödyt olivat lohkoilla, joissa ravinteisuus oli korkealla tasolla ja lisäksi korkea P-luku esti fosforin käytön. Tällöin kierrätyslannoitteet olivat typpilannoitteena paljon kalliimpia kuin edullisimmat väkilannoitteet, joten laskuri ei suositellut niiden käyttöä. Lisäksi edullisempien typenlähteiden mukana tulee kierrätyslannoitteissa pieniä määriä fosforia, mikä on kuitenkin ympäristökorvauksen ehtojen mukaan kiellettyä, jos fosforitasot ovat korkeat.

Eri lohkoille laskuri suositteli koko tarkasteltua lannoitevalikoimasta (n=24) kymmentä (10) lannoitetta. Yleisimmin laskuri suositteli PK-hivenkalkkia, väkevää ravinneseosta, kompostoitua ravinnekuitua sekä hivenlannoitteita (sinkkisulfaatti ja lannoiteboraatti). Lannoitevaihtoehdoilla ei saatu kaikkia ravinteita kustannustehokkaasti. Fosforin ja kaliumin lannoitus erikseen edullisimmilla väkilannoitteilla olisi kustannustehokkaampaa kuin tarkasteltujen kierrätysravinteiden käyttö (Taulukko 6). Lisäksi korkean fosforin lohkoilla kierrätysravinteilla ei ollut kustannustehokasta lannoittaa juuri mitään ravinteita.



Kuva 10. Lohkokohtaisen optimoidun lannoituksen kustannukset ja nettohyöty (ravinteiden arvo + kalkitus- ja multavuusvaikutus – kustannukset) 20 esimerkkilohkolle Soilfood Oy:n lannoitteilla laskettuna. Lyhenteet kuvaavat OSMO hankkeen 20 esimerkkilohkoa (Mattila ja Rajala, 2017).

Luomulannoitussuunnitelmassa sekä käytetyt lannoitemäärät että nettohyödyt olivat suurempia kuin tavanomaisilla lannoitteilla laskettaessa (Kuva 11). Kierrätyslannoituksen kustannukset olivat lohkoista riippuen 158-714 €/ha (keskim. 503 €/ha), mutta lannoitteiden ravinteiden arvo oli 327-1028 €/ha (keskim. 934 €/ha) ja kalkitus- ja multavuushyöty oli 118-169 €/ha (keskim. 150 €/ha). Hyötyjen ja kustannusten suhde oli keskimäärin 2,2 €/€ ja lohko-kohtainen nettohyöty oli keskimäärin 580 €/ha (202-1074 €/ha). Suurimmat hyödyt olivat lohkoilla, joissa oli sekä kalkitustarvetta, että puutetta hivenaineista, fosforista ja kaliumista (He 0, Ha 1, Ha 0, He 1). Luomulannoituksessa kierrätyslannoitteet ovat kustannustehokkaita myös lohkoille, joissa ei voitu lisätä fosforia. Laskuri suositteli lohkoille Boost NK-vinassia sekä rikki- ja magnesiumlannoitteeksi kiseriittiä. Koko lannoitevalikoimasta (n=24) eri lohkoille suositeltiin 15 eri lannoitetta. Yleisimmät lannoitteet olivat hivenravinteiden lisäksi kompostoitu ravinnekuitu, PK-hivenkalkki, väkevä ravinne-seos ja eri vinassit (Boost NK, NKS ja NS). Lannoitevalikoimalla saatiin kasvien ravinnepoistuma ja lohkon viljavuuden kehittäminen täydennettyä, mutta kaliumin osalta jäi puutetta etenkin perunanviljelyssä sekä lohkoilla, joissa kaliuminpuute oli vakava. Lisäksi mangaanin puutteen korjaaminen maaperän kautta ei ollut kyseisillä tuotteilla kustannustehokasta.



Kuva 11. Lohkokohtaisesti optimoidun lannoituksen kustannukset ja nettohyöty (ravinteiden arvo + kalkitus- ja multausvaikutus – kustannukset) 20 esimerkkilohkelle Soilfood Oy:n lannoitteilla laskettuna luomulannoitteisiin verrattuna. Lyhenteet kuvaavat OSMO hankkeen 20 esimerkkilohkoa (Mattila ja Rajala, 2017).

Johtopäätökset

Lannoituksen suunnittelu on moniulotteinen ja myös monimutkainen prosessi, jossa joudutaan yhdistämään lohkon ominaisuuksia, kasvin ravinnetarpeita ja käytettävissä olevia lannoitteita. Lisäksi lannoitusta säädellään asetuksin ja tuotantoehdoin. Myös tilan viljelykäytännöt asettavat omat rajoitteensa. Aiheen monipuolisuus tekee aihealueesta lupaavan kehityskohteen tietokoneavusteisen päätöksenteon tukijärjestelmän (*decision support system*, DSS) kehitykselle. Tässä raportissa hahmoteltiin lannoitus-suunnittelun taustatekijöitä ja teoreettista taustaa sekä esitettiin eräs ratkaisuvaihtoehto lannoituksen optimointiin lineaariohjelmoinnin keinoin. Avoimella lähdekoodilla lisensoidun LaPaMa –laskurin (www.luonnonkoneisto.fi/lannoitaparemmiin) avulla optimointia voidaan kehittää osana muita sovelluksia. Laskurin tulosten perusteella lannoitus-suunnittelun optimoinnilla löydetään nopeasti lannoitevalikoimasta kustannustehokkaimmat ja lohkolle soveltuvimmat lannoitteet. Tulosten perusteella kierrätyslannoitteiden potentiaali on suurempaa luonnonmukaisessa tuotannossa kuin tavanomaisessa tuotannossa, koska luonnonmukaisessa tuotannossa täydennysravinteiden hinnat ovat korkeampia.

Lähteet

- Amrani, M., Westfall, D.G. & Peterson, G.A., 1999. Influence of water solubility of granular zinc fertilizers on plant uptake and growth. *Journal of Plant Nutrition* 22: 1815–1827.
- Bertsimas, D. & Tsitsiklis, J.N., 1997. *Introduction to linear optimization*. Athena Scientific, Belmont, Massachusetts.
- Blackert, C., 2018. Kväveupptag i höstvetet med Blackert-metoden. *Arvensis* 2018, 12–15.
- Bryson, G.M. & Mills, H.A., 2015. *Plant analysis handbook. A guide to sampling, preparation, analysis, and interpretation of agronomic and horticultural crops.*, 4. painos. Micro-Macro Publishing, Athens, Georgia.
- Calvo, P., Nelson, L. & Kloepper, J.W., 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil* 383: 3–41.
- Celestina, C., Hunt, J.R., Sale, P.W.G. & Franks, A.E., 2019. Attribution of crop yield responses to application of organic amendments: A critical review. *Soil and Tillage Research* 186: 135–145.
- Cerrato, M.E. & Blackmer, A.M., 1990. Comparison of Models for Describing; Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer. *Agronomy Journal* 82: 138–143.
- Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D. & Balesdent, J., 2019. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research, Soil Carbon and Climate Change: the 4 per Mille Initiative* 188: 41–52.
- Cooper, W.W., Seiford, L.M. & Tone, K., 2000. *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*. Springer, US.
- Cusick, P.R., Kelling, K.A., Powell, J.M. & Munoz, G.R. 2006. Estimates of residual dairy manure nitrogen availability using various techniques. *Journal of environmental quality* 35: 2170–2177.
- Dari, B., Nair, V.D., Sharpley, A.N., Kleinman, P., Franklin, D. & Harris, W.G., 2018. Consistency of the Threshold Phosphorus Saturation Ratio across a Wide Geographic Range of Acid Soils. *Agrosystems, Geosciences & Environment* 1: 180028
- Dent, J.B. & Casey, H., 1967. *Linear programming and animal nutrition*. Lockwood, USA. .
- Dontsova, K.M. & Norton, L.D., 2002. Clay dispersion, infiltration, and erosion as influenced by exchangeable Ca and Mg. *Soil Science* 167: 184–193.
- Eurofins, 2012. Tulostaari <https://tulostaari.fi/index.php?id=41> [viitattu 23.4.2019].
- Fischer, P., Pöthig, R. & Venohr, M., 2017. The degree of phosphorus saturation of agricultural soils in Germany: Current and future risk of diffuse P loss and implications for soil P management in Europe. *Science of The Total Environment* 599–600: 1130–1139.
- Haney, R.L., Haney, E.B., Smith, D.R., Harmel, R.D. & White, M.J., 2018. The soil health tool—Theory and initial broad-scale application. *Applied Soil Ecology* 125: 162–168.
- Harmel, R.D. & Haney, R.L., 2013. Initial Field Evaluation of the Agro-Economic Effects of Determining Nitrogen Fertilizer Rates with a Recently-Developed Soil Test Methodology. *Open Journal of Soil Science* 03: 91–99.
- Harmen, K., Loman, H. & Neeteson, J.J., 1990. A derivation of the Pierre-Sluijsmans equation used in the Netherlands to estimate the acidifying effect of fertilizers applied to agricultural soils. *Fertilizer Research* 26: 319–325.
- Hatfield, A.L., 1972. Soil test reporting a nutrient index system. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 3: 425–436.
- Hochmuth, G. & Hanlon, E., 2010. *Principles of sound fertilizer recommendations*. University of Florida, IFAS Extension SL315.
- IPNI, 2014. IPNI Estimates of Nutrient Uptake and Removal. <http://www.ipni.net/article/IPNI-3296> [viitattu 23.4.2019].
- IPNI, 2019. 4R Educational Modules: Site Specific Nutrient Mangement. <http://www.nutrientstewardship.com/training/> [viitattu 2.4.2019].
- Jakubus, M. & Tatuško, N., 2017. Evaluation of Metals Bioavailability in Agricultural Soil Treated with Wood Ash. *Polish Journal of Soil Science* 49: 195.

- Jordan-Meille, L., Rubæk, G.H., Ehlert, P. a. I., Genot, V., Hofman, G., Goulding, K., Recknagel, J., Provolo, G. & Barraclough, P., 2012. An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management* 28: 419–435.
- Karklins, A. & Ruza, A., 2015. Nitrogen apparent recovery can be used as the indicator of soil nitrogen supply. *Zemdirbyste-Agriculture* 102: 133–140.
- Kinnunen, O., Mattila, T.J. & Rajala, J., 2018. Uusia menetelmiä maaperästä vapautuvan typen määrän arviointiin. Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti, Mikkeli.
- Kirkby, E., 2012. Introduction, definition and classification of nutrients, in: Marschner P. (ed.) *Mineral Nutrition of Higher Plants*, 3.painos. Elsevier, s. 3–5.
- Lashermes, G., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Chaussod, R., Guillotin, M.L., Linères, M., Mary, B., Metzger, L., Morvan, T., Tricaud, A., Villette, C. & Houot, S., 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science* 60: 297–310.
- Liang, C., Schimel, J.P. & Jastrow, J.D., 2017. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology* 2: 17105.
- Lory, J.A., Davis, G., Steen, D., Li, B. & Fulhage, C., 2007. Calculating plant-available nitrogen and residual nitrogen fertilizer value in manure. *Agricultural MU Guide*, G 9186. <https://mospace.umsystem.edu/xmlui/handle/10355/51239>
- LUKE, 2015. Kasper – Fosforilaskuri. <https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/kasper/pelto/peltopalvelut/fosforilaskuri> [viitattu 27.5.2019].
- LUKE, 2014. Luke Rehutaulukot <https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/Rehutaulukot/Rehutaulukot> [viitattu 23.4.2019].
- Mattila, T.J., Manka, V. & Rajala, J., 2018. Pikamenetelmät kasvin ravinnetilan kuvaajana. Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti, Mikkeli.
- Mattila, T.J. & Rajala, J., 2017. Mistä ja miten tunnistaa maan hyvän kasvukunnon? Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti, Mikkeli.
- Mattila, T.J. & Rajala, J., 2018. Kationinvaihtokapasiteetin määrittäminen ja käyttö viljavuusanalyysin tulkinnaissa. Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti, Mikkeli.
- Matula, J., 2009. A relationship between multi-nutrient soil tests (Mehlich 3, ammonium acetate, and water extraction) and bioavailability of nutrients from soils for barley. *Plant, Soil and Environment* 55: 173–180.
- Matula, J. & Pechová, M., 2005. Influence of gypsum treatment on extractability of nutrients from soils. *Plant Soil and Environment* 51: 368.
- MAVI, 2008. Ravinnetaseet. Ympäristötuen lisätoimenpide lannoituksen ja sadon ravinnemäärien seurantaan.
- Meda, A.R., Cassiolato, M.E., Pavan, M.A. & Miyazawa, M., 2001. Alleviating soil acidity through plant organic compounds. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 44: 185–189.
- Mittelmann, H., 2019. Benchmark of simplex LP solvers. <http://plato.asu.edu/ftp/lpsimp.html> [viitattu 23.4.2019].
- Mokolobate, M. & Haynes, R., 2002. Comparative liming effect of four organic residues applied to an acid soil. *Biol Fertil Soils* 35: 79–85.
- Nätterlund, H., 2015. Optimal utnyttjande av kväve vid tillförsel av organiska specialgödselmedel till höstvet. HIR Skåne, Ruotsi.
- Olson, R.A., Frank, K.D., Grabouski, P.H. & Rehm, G.W., 1982. Economic and Agronomic Impacts of Varied Philosophies of Soil Testing I. *Agronomy Journal* 74: 492–499.
- Pocknee, S. & Sumner, M.E., 1997. Cation and Nitrogen Contents of Organic Matter Determine Its Soil Liming Potential. *Soil Science Society of America Journal* 61: 86–92.
- Ravander, J., Mattila, T.J. & Rajala, J., 2019. Murukestävyys maan kasvukunnon mittarina. Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti, Mikkeli.
- Römheld, V., 2012. Diagnosis of deficiency and toxicity of nutrients, in: Marschner, P. (ed.) *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Elsevier, s. 299–312.
- Salo, T., 2018. Multavuuden lisäysmahdollisuudet maanparannusaineilla, mitä on tutkittu ja mitä tulokset kertovat. Esitys seminaarissa: ”Multavuuden hoito”, 7.3.2018, Kokemäki.
- Salo, T., Eurola, M., Rinne, M., Seppälä, A., Kaseva, J. & Kousa, T., 2014. The effect of nitrogen and phosphorus concentrations on nutrient balances of cereals and grass silage. MTT, Jokioinen. MTT raportteja 147.

- Schröder, J., Bechini, L., Bittman, S., Brito, M., Delin, S., Lalor, S., Morvan, T., Chambers, B., Sakrabani, R. & Sørensen, P., 2013. Residual N effects from livestock manure inputs to soils. Konferenssiesitys RAMIRAN International Conference, Recycling Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture Network (RAMIRAN), S10.04.1-S10.04.4.
- Schulte, E.E., 1992. Soil and applied manganese, Understanding plant nutrients. University of Wisconsin-Extension, Madison, Wisconsin.
- Shober, A.L. & Taylor, R.W., 2015. Estimating Yield Goal for Crops. Extension Factsheet <http://extension.udel.edu/factsheets/estimating-yield-goal-for-crops/> [viitattu 23.4.2019].
- Sullivan, D.M., Andrews, N.A., Luna, J.M. & McQueen, J.P.G., 2010. Estimating N contribution from organic fertilizers and cover crop residues using online Calculators, in: Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science; Soil Solutions for a Changing World. International Union of Soil Sciences.
- Sweetlove, L.J. & Ratcliffe, R.G., 2011. Flux-Balance Modeling of Plant Metabolism. *Front. Plant Sci.* 2: 38
- Tremblay, N., Wang, Z., Ma, B.-L., Belec, C. & Vigneault, P., 2008. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. *Precision Agriculture* 10: 145.
- Virkajärvi, P., Kykkänen, S., Rätty, M., Hyrkäs, M., Järvenranta, K., Isolahti, M. & Kauppila, R., 2014. Nurmien kaliumtalous. Maan reservikaliumin merkitys kaliumlannoituksen suunnittelussa. Luonnonvarakeskus, Jokioinen.
- Weil, R.R. & Brady, N.C., 2016. The Nature and Properties of Soils, 15. painos, Pearson, Columbus.
- Yan, F., Schubert, S. & Mengel, K., 1996. Soil pH increase due to biological decarboxylation of organic anions. *Soil Biology and Biochemistry* 28: 617–624.
- Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T.D., Dumas, P. & Shen, Y., 2015. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528: 51–59.



ISBN 978-952-11-5051-7 (nid.)
ISBN 978-952-11-5052-4 (PDF)
ISSN 1796-1718 (pain.)
ISSN 1796-1726 (verkkok.)